

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»  
 Отделение ядерно-топливного цикла

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Влияние диаметра входного клапана и температуры газообразного UF<sub>6</sub> на динамику его десублимации в ёмкостях без оребрения</b>

УДК 621.039.54:661.879.1.04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Котельникова Александра Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов Алексей Алексеевич	д.т.н., профессор		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дорофеева Людмила Ивановна	к.ф.-м.н.		

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области технологий ядерно-топливного цикла, физики кинетических явлений, методов разделения жидких и газовых смесей, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области изотопных технологий и материалов, получения высокочистых веществ, переработки, утилизации и обезвреживания промышленных отходов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие явления и закономерности в области изотопных технологий и материалов, проводить исследования в области разделения молекулярных и изотопных смесей, получения высокочистых веществ.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы расчета каскадов для разделения молекулярных и изотопных смесей, эксплуатировать, проводить испытания, монтаж и настройку современных физических установок и устройств.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение
P6	Разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, проектировать и организовывать инновационный бизнес, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности, использовать современные достижения и передовые технологии получения и применения изотопно-модифицированных материалов в профессиональной деятельности
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»  
Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
Л.И. Дорофеева  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ81	Котельниковой Александре Александровне

Тема работы:

<b>Влияние диаметра входного клапана и температуры газообразного UF<sub>6</sub> на динамику его десублимации в ёмкостях без оребрения</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 62-51/с от 02.03.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020
--	------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Задание. Литературные источники по основам процесса десублимации UF <sub>6</sub> и особенностям процесса десублимации на разделительных предприятиях. Математическая модель нестационарного процесса десублимации UF <sub>6</sub> в вертикальные погружные ёмкости.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	При разработке темы должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Обзор и анализ литературы. 2. Исследование влияния диаметра входного клапана и температуры газообразного UF <sub>6</sub> на динамику его десублимации в ёмкостях без оребрения объёмом 1,0...4,0 м <sup>3</sup> . 3. Экономический расчёт. 4. Охрана труда и техника безопасности. 5. Выводы. Заключение.

<b>Перечень графического материала</b>	<p>Рисунок 1.1 – Фазовая диаграмма <math>UF_6</math>;</p> <p>Рисунок 1.2 – Основные стадии сублиматного производства <math>UF_6</math>;</p> <p>Рисунок 1.3 – Горизонтальная транспортная ёмкость;</p> <p>Рисунок 1.4 – Аппарат с тепловым сбросом;</p> <p>Рисунок 1.5 – Схема охлаждения вертикальных ёмкостей;</p> <p>Рисунок 2.1 – Вертикальная погружная транспортная ёмкость без оребрения;</p> <p>Рисунок 2.2 – Вертикальная погружная ёмкость без оребрения и расчётная область ёмкости;</p> <p>Рисунок 3.1 – Зависимость средней производительности ёмкостей от температуры газообразного <math>UF_6</math> в коллекторе;</p> <p>Рисунок 3.2 – Зависимость времени заполнения ёмкостей от температуры газообразного <math>UF_6</math> в коллекторе;</p> <p>Рисунок 3.3 – Динамика массы десублимированного <math>UF_6</math> и средней производительности ёмкости объёмом <math>1,0 \text{ м}^3</math> при изменении температуры газообразного <math>UF_6</math>;</p> <p>Рисунок 3.4 – Зависимость средней производительности ёмкостей без оребрения различного объёма от диаметра входного клапана;</p> <p>Рисунок 3.5 – Зависимость времени заполнения ёмкостей без оребрения различного объёма от диаметра входного клапана;</p> <p>Рисунок 3.6 – Динамика массы десублимированного <math>UF_6</math> в ёмкости объёмом <math>1,0 \text{ м}^3</math> от времени её заполнения.</p>
--	--

#### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
<b>Описание объекта исследований</b>	Профессор Отделения ядерно-топливного цикла, д.т.н. Орлов Алексей Алексеевич
Вертикальные погружные ёмкости без оребрения для десублимации гексафторида урана объёмом $1,0$ ; $2,0$ ; $2,5$ ; $3,0$ и $4,0 \text{ м}^3$ .	
Анализ полученных данных	Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.т.н. Кащук Ирина Вадимовна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	Ассистент Отделения ядерно-топливного цикла, к.ф.-м.н. Гоголева Татьяна Сергеевна
Часть на иностранном языке	Старший преподаватель Отделения иностранных языков, Смирнова Ульяна Александровна

#### Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:

Influence of the inlet valve diameter and the gaseous  $UF_6$  temperature on the dynamics of filling tanks without finning of desublimated  $UF_6$

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	12.03.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов Алексей Алексеевич	д.т.н., профессор		12.03.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Котельникова Александра Александровна		12.03.2020

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Котельниковой Александре Александровне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы	Ядерно-топливного цикла
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научно-исследовательской работы (НИР): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30%

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала НИР	– Потенциальные потребители результатов исследования; – Анализ конкурентных технических решений; – Матрица SWOT-анализ.
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения НИР	Формирование плана и графика разработки: – Составление перечня этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ; – Разработка календарного плана проведения НИР.
3. Составление бюджета НИР	Формирование бюджета затрат на исследование: – Материальные затраты; – Амортизационные отчисления на специальное оборудование; – Основная и дополнительная заработная плата исполнителей НИР; – Отчисления в государственные страховые фонды; – Накладные расходы.
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности НИР и потенциальных рисков	Определение интегрального финансового показателя, интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального показателя эффективности научного исследования.

<b>Перечень графического материала</b>
1. Карта сегментирования рынка услуг; 2. Оценочная карта конкурентных технических решений; 3. Матрица SWOT; 4. Календарный план-график выполнения ВКР; 5. График разработки и внедрения НИР; 6. Бюджет НИР; 7. Основные показатели эффективности НИР.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	12.03.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	К.Т.Н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Котельникова Александра Александровна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Котельниковой Александре Александровне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы	Ядерно-топливного цикла
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерная физика и технологии»

Тема ВКР:

**Влияние диаметра входного клапана и температуры газообразного UF<sub>6</sub> на динамику его десублимации в ёмкостях без оребрения**

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: технология десублимации UF<sub>6</sub> в вертикальные ёмкости без оребрения различного объёма.</p> <p>Область применения: корректировка режима десублимации гексафторида урана в АО «ПО ЭХЗ».</p>
---	---

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <p>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ;</p> <p>– ГОСТ 12.2.032-78;</p> <p>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03;</p> <p>– ТОИ Р-45-084-01;</p> <p>– СНиП 23-05-95;</p> <p>– ГОСТ 12.1.003-74;</p> <p>– ГОСТ Р 12.1.019-2009;</p> <p>– ГОСТ 12.1.038-82;</p> <p>ГОСТ 12.1.004-91.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность</b></p> <p>2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2 Обоснование мероприятий по снижению их воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы при эксплуатации объекта исследования: химические вещества, ионизирующее излучение.</p> <p>Вредные и опасные факторы в ходе проведения исследования:</p> <p>– отклонение показателей микроклимата в помещении;</p> <p>– недостаточная освещённость рабочей зоны;</p> <p>– шум;</p> <p>– электромагнитное излучение;</p> <p>– нервно-психические перегрузки;</p> <p>поражение электрическим током.</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность</b></p>	<p>– анализ воздействия сублиматного завода на окружающую среду;</p> <p>– защита окружающей среды.</p>



<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b>	– выбор и описание возможных чрезвычайных ситуаций; – анализ наиболее вероятной ЧС при выполнении исследования - возгорание и возникновение пожара на рабочем месте; – превентивные меры и порядок действий во время ЧС.
---	--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	12.03.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Котельникова Александра Александровна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает в себя: 120 страниц, 27 таблиц, 15 рисунков, 82 библиотечные ссылки, 42 формулы, 1 приложение.

Ключевые слова: математическое моделирование, десублимация, гексафторид урана, тепло- и массоперенос, геометрия ёмкости.

Объект исследования: вертикальные погружные ёмкости без оребрения объёмом 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 и 4,0 м<sup>3</sup> для десублимации гексафторида урана.

Цель работы: проведение численных исследований влияния температуры газообразного UF<sub>6</sub> и диаметра входного клапана на динамику процесса десублимации UF<sub>6</sub> в вертикальные ёмкости без оребрения объёмом 1,0...4,0 м<sup>3</sup> для определения возможности повышения их производительности.

В процессе исследования проводился: расчёт производительности ёмкостей объёмом 1,0...4,0 м<sup>3</sup> и времени их заполнения десублимированным UF<sub>6</sub> при изменении температуры газообразного UF<sub>6</sub> в коллекторе в интервале от 10 до 40°C; расчёт средней производительности и времени заполнения ёмкостей объёмом 1,0...4,0 м<sup>3</sup> при изменении диаметра входного клапана от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $65 \cdot 10^{-3}$  м с шагом  $5 \cdot 10^{-3}$  м.

В результате проведённого численного моделирования показано, что увеличение температуры газообразного UF<sub>6</sub> в коллекторе с 10 до 40°C приводит к линейному уменьшению средней производительности ёмкостей объёмом 1,0...4,0 м<sup>3</sup> на 7,0...7,4% и увеличению времени их заполнения на 6,8...7,6%. Увеличение диаметра входного клапана от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $65 \cdot 10^{-3}$  м приводит к существенному увеличению средней производительности (на 76...88%) и уменьшению времени заполнения ёмкостей (в 4,2...8,3 раз). Определены диаметры входных клапанов, достаточные для эффективной работы ёмкостей: для ёмкости объёмом 1,0 м<sup>3</sup>  $d_{in}$  равен  $25 \cdot 10^{-3}$  м, для ёмкостей объёмом 2,0; 2,5; 3,0 м<sup>3</sup> –  $30 \cdot 10^{-3}$  м, для ёмкости объёмом 4,0 м<sup>3</sup> –  $35 \cdot 10^{-3}$  м.

В дальнейшем полученные результаты могут быть использованы для корректировки режима десублимации гексафторида урана в вертикальных погружных ёмкостях без оребрения в АО «ПО ЭХЗ».

## Оглавление

Введение .....	14
1. Физико-химические свойства гексафторида урана и особенности его десублимации на разделительных предприятиях.....	16
1.1 Физические и химические свойства $UF_6$ и лёгких примесей.....	16
1.1.1 Гексафторид урана .....	17
1.1.2 Фтористый водород.....	19
1.1.3 Фтор.....	20
1.1.4 Трифторид хлора .....	22
1.1.5 Аммиак.....	23
1.1.6 Углекислый газ .....	24
1.1.7 Физические свойства других примесей.....	25
1.2 Анализ процессов десублимации $UF_6$ .....	26
1.2.1 Особенности десублимации $UF_6$ на разделительных предприятиях ..	27
1.2.2 Аппаратурное оформление процессов десублимации .....	28
1.2.3 Конденсационно-испарительные установки разделительных производств .....	31
1.2.4 Способы охлаждения и нагрева, применяемые в конденсационно-испарительных установках .....	38
2. Двухмерная математическая модель процесса десублимации $UF_6$ в вертикальные погружные ёмкости.....	45
2.1 Объект исследования .....	45
2.2 Математическая модель .....	46
2.3 Принятые допущения.....	46
2.4 Основные уравнения теплообмена и газовой динамики .....	47
3. Результаты исследований и их обсуждение .....	51
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	59
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	59
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	60
4.1.2 SWOT-анализ.....	62

4.2 Планирование научно-исследовательской работы .....	63
4.3 Бюджет научного исследования .....	65
4.3.1 Материальные затраты на исследование.....	65
4.3.2 Расчёт амортизации специального оборудования .....	67
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей .....	68
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей .....	70
4.3.5 Отчисления в государственные страховые фонды .....	70
4.3.6 Накладные расходы .....	71
4.3.7 Формирование бюджета затрат на научно-исследовательскую работу.....	71
4.4 Определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	72
5. Социальная ответственность .....	76
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	76
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	76
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя. ....	77
5.2 Производственная безопасность .....	79
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования .....	79
5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	80
5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов .....	84
5.3 Экологическая безопасность .....	89
5.3.1 Анализ влияния процесса эксплуатации объекта на окружающую среду.....	89
5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....	90
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	92

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	92
5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте	93
5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	93
Заключение .....	96
Список публикаций .....	97
Список литературы .....	100
Приложение А .....	108

## Введение

В настоящее время на разделительных предприятиях ядерно-топливного цикла осуществляется модернизация основного технологического оборудования [1–3]. Газовые центрифуги заменяются более эффективными машинами нового поколения. За счёт этого возникает потребность увеличения производительности сублиматоров гексафторида урана, являющихся неотъемлемой частью предприятий разделительно-сублиматного комплекса ядерно-топливного цикла. Решить данную задачу можно следующими способами:

1. Разработать и спроектировать конденсационно-испарительные установки (КИУ) с повышенной производительностью;
2. Оптимизировать режимы работы используемых установок, обеспечив максимальную скорость десублимации (сублимации)  $UF_6$  и полноту заполнения транспортных ёмкостей;
3. Усовершенствовать конструкции транспортных ёмкостей.

В настоящее время технологические режимы работы коллекторов десублимации  $UF_6$  в основном основаны на экспериментально полученных данных. Разработка математических моделей процесса десублимации  $UF_6$  в ёмкости, а также численное моделирование позволяют определять закономерности протекания данного процесса и разрабатывать обоснованные рекомендации по повышению производительности их работы за более короткое время при меньших затратах, чем при реализации экспериментальных подходов на функционирующем оборудовании и установках.

Одним из перспективных путей достижения целей, поставленных перед разделительными предприятиями Росатома, является разработка математических моделей, учитывающих нестационарность процессов тепло- и массообмена десублимации  $UF_6$ .

Процесс десублимации гексафторида урана (ГФУ) является нестационарным, однако, обзор и анализ литературных данных [4] показал,

что разработанные в настоящее время математические модели процесса десублимации гексафторида урана являются стационарными, либо квазистационарными.

Существующие математические модели процесса десублимации  $UF_6$  имеют определённые недостатки [4]: используют для расчёта эмпирические данные, не учитывают нестационарность процессов тепло- и массообмена, конвективное и диффузионное перемещение газообразного  $UF_6$  в ёмкостях, наличие внутреннего оребрения.

В связи с этим для теоретического исследования нестационарного процесса десублимации  $UF_6$  в транспортные ёмкости необходимо разработать математическую модель, основанную исключительно на физических представлениях о протекающем процессе и лишённую недостатков известных моделей.

В данной работе приведено описание разработанной, программно реализованной и верифицированной двухмерной математической модели нестационарного процесса десублимации  $UF_6$  в вертикальные погружные ёмкости [5-7] и полученных с её помощью результатов исследования влияния температуры газообразного  $UF_6$  в коллекторе и диаметра входного клапана ёмкостей различного объёма без оребрения на время заполнения и среднюю производительность этих ёмкостей.

## 1. Физико-химические свойства гексафторида урана и особенности его десублимации на разделительных предприятиях

### 1.1 Физические и химические свойства $UF_6$ и лёгких примесей

$UF_6$  применяется на различных стадиях процесса обогащения разделительных предприятий в разных агрегатных состояниях. В газовой фазе  $UF_6$  применяют на разделительных и сублиматных заводах, в жидкой – на участках перелива, в твёрдой – для транспортировки и хранения.

В современных технологиях атомной энергетики существенное внимание отводится содержанию примесей не только конечных продуктов, но и на промежуточных стадиях процессов.

На стадии обогащения урана используется гексафторид урана, в котором постоянно присутствуют примеси, молекулярная масса которых меньше массы  $UF_6$ : фториды, оксифториды и оксиды металлов и неметаллов, а также компоненты воздуха. Процентное содержание HF в гексафториде урана существенно превышает суммарное содержание других примесей [8].

Согласно диаграмме состояния  $UF_6$ , процесс десублимации при атмосферном давлении протекает при температуре ниже  $56,4^{\circ}C$  ( $329,4\text{ K}$ ). Переход фтористого водорода из газа в жидкость происходит при температуре  $19,5^{\circ}C$  ( $292,9\text{ K}$ ). В таблице 1.1 представлены температуры фазовых переходов примесных компонентов технологического газа [9-11].

Таблица 1.1 – Температуры фазовых переходов примесных газовых компонентов  $UF_6$  при атмосферном давлении

Примесные газовые компоненты $UF_6$	Температура конденсации, K	Температура затвердевания, K
HF	292,9	189,9
$N_2$	77,2	63,14
$O_2$	90	53
$F_2$	88	55



В таблице 1.1 показано, что ни один из компонентов технологического газа при температуре 56,4°C (329,4 K) не десублимируется. Следовательно, в устройстве будет десублимирован только  $\text{UF}_6$ .

Фторирование оксидов урана даёт примерно 45%  $\text{UF}_6$ , 40%  $\text{O}_2$ , 15%  $\text{F}_2$  и 15%  $\text{HF}$  и других примесей. В результате получения гексафторида урана в пламенном реакторе образуются до 25% примесей, таких как:  $\text{F}_2$ ,  $\text{HF}$  и др. [12].

### 1.1.1 Гексафторид урана

Гексафторид урана - газ, который используется в качестве рабочего вещества при обогащении урана по изотопу  $^{235}\text{U}$ . Гексафторид урана, обогащённый и обеднённый по лёгкому изотопу десублимируют в специальные ёмкости и отправляют на предприятия по изготовлению ядерного топлива, тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок.

Применение  $\text{UF}_6$  в различных технологиях разделения изотопов урана объясняется двумя причинами:

1. возможность обогащения в газовой фазе;
2. фтор имеет только один природный изотоп, что облегчает процесс разделения изотопов урана.

После производства  $\text{UF}_6$  десублимируют в ёмкости и одновременно происходит его очистка от примесей. Аппараты фторирования покидает смесь газов, имеющих разные температуры фазового перехода, следующего состава:  $\text{UF}_6$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{O}_2$ .

По определению, фазовый переход – это переход вещества, при изменении внешних условий, из одной термодинамической фазы в другую. Точкой перехода называется значение давления или температуры, при которой происходит фазовый переход. Фазовый переход происходит, когда система пересекает линию, разделяющую две фазы, при изменении её интенсивных параметров (температуры, давления).

Диаграмма состояния гексафторида урана приведена на рисунке 1.1.

При нормальных условиях  $\text{UF}_6$  представляет собой светло-серые или

прозрачные летучие кристаллы с плотностью 5,09 г/см<sup>3</sup>. При атмосферном давлении ГФУ - возгоняется, не плавясь, при более высоких давлениях - плавится с образованием прозрачной бесцветной жидкости, обладающей большой плотностью [13].

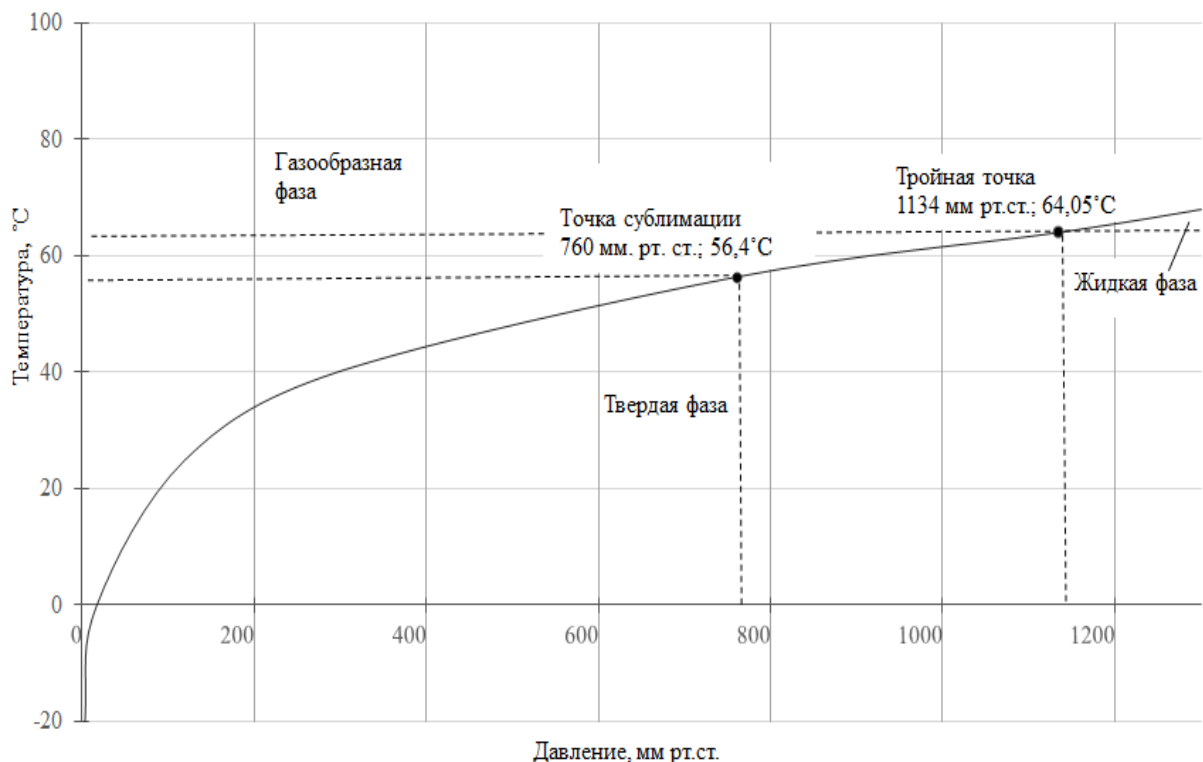
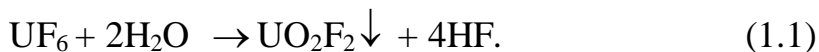
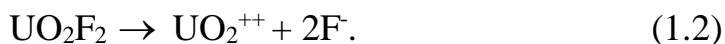


Рисунок 1.1 – Фазовая диаграмма UF<sub>6</sub>

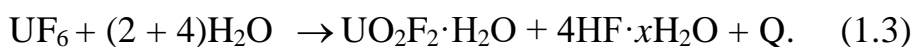
На воздухе UF<sub>6</sub> мгновенно взаимодействует с водой и её парами, гидролизуется и образует нелетучее соединение - уранилфторид (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) и плавиковую кислоту (HF):



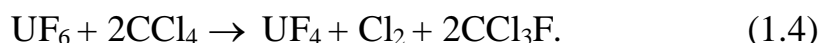
Дальнейшее взаимодействие с водой приводит к диссоциации уранилфторида (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>):



Реакция с избытком воды происходит по уравнению [14]:

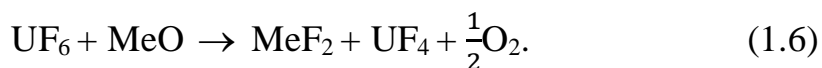


Взаимодействие UF<sub>6</sub> со всеми органическими соединениями приводит к образованию нелетучего тетрафторида UF<sub>4</sub> и ряда промежуточных соединений:



В реакциях органических растворителей с  $\text{UF}_6$  происходит образование практически идеальных растворов. Реакции  $\text{UF}_6$  с бензолом, эфиром и спиртом протекают уже при комнатной температуре. В присутствии кислорода в молекуле растворителя  $\text{UF}_6$  переходит в  $\text{UO}_2\text{F}_2$ . Взаимодействие с углеводородами сопровождается образованием  $\text{UF}_4$  и промежуточных фторидов урана.

Взаимодействие  $\text{UF}_6$  с поверхностями металлов и их оксидов приводят к коррозии (потери рабочего вещества):



Образование металлофторидных плёнок на рабочих поверхностях и подвижных деталях приводят к снижению надёжности технологического оборудования.

Газообразный  $\text{UF}_6$  переходит в нелетучий тетрафторид урана в результате реакции с водой, органическими веществами и металлами, отдав часть своего фтора. Тетрафторид урана, осаждённый во внутренних полостях разделительных машин, удаляется из технологического процесса. Потери рабочего вещества приводят к уменьшению разделительной способности разделительных машин.

К взаимодействию с  $\text{UF}_6$  наиболее устойчивы такие материалы, как: алюминий, магний, медь, никель, а также сплавы. Устойчивость этих металлов объясняется образованием поверхностных плёнок фторидов металлов, а у алюминия — окисью алюминия. Из синтетических материалов фторидная смазка и тефлон являются наиболее устойчивыми к взаимодействию с гексафторидом урана.

### 1.1.2 Фтористый водород

В технологическую цепочку фтористый водород поступает вместе с сырьём, так как является основной примесью  $\text{UF}_6$ , а также образуется за счёт

попадания в оборудование влаги воздуха.

Фтористый водород – бесцветный газ или подвижная жидкость, дымящая на воздухе. HF является едким веществом, в жидком состоянии быстро разъедает прокладки из резины. Фтористый водород является сильнейшим дегидратирующе веществом, хорошо растворяется в воде, образуя фтористоводородную кислоту.

Таблица 1.2 – Физические свойства HF

Температура плавления	минус 83,6°C (189,4 K)
Температура кипения	19,543°C (292,543 K)
Плотность HF при температуре:	
19,4°C (292,4 K)	0,991 г/см <sup>3</sup>
минус 93°C (180,0 K)	1,653 г/см <sup>3</sup>

Фтористый водород вступает в реакции с металлами в ряду напряжений, расположенных ниже водорода, кроме образующих защитные плёнки из тугоплавких фторидов (алюминий, железо, магний, никель). Наличие окислителей в фтористом водороде приводит к коррозии меди, в то время как их отсутствие не оказывает на неё влияния. Нержавеющая сталь и свинец под действием HF легко подвергаются коррозии и разрушению. Более стабильными к воздействию HF материалами являются железо и сталь. Реакции фтористого водорода с окисями вольфрама, серы, фосфора и урана приводят к образованию оксифторидов и фторкислот [15].

### 1.1.3 Фтор

Фтор поступает на разделительные предприятия с сублиматных производств в ёмкостях вместе с сырьём, а также с отвалами прошлых лет. Фтор используется для тепловой обработки блоков очистительного каскада (ОК) и золоулавливающих фильтров при проведении их ремонта. Газообразный фтор имеет светло-жёлтый цвет, в жидком состоянии - грязно-жёлтый цвет.

Таблица 1.3 – Физические свойства фтора

Температура плавления	минус 218°С (55 К)
Температура кипения	минус 188°С (85 К)
Плотность газообразного F <sub>2</sub>	0,001696 г/см <sup>3</sup>

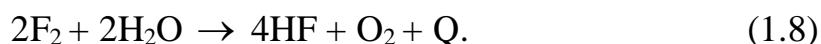
Зависимость давления насыщенного пара жидкого фтора в интервале температур от минус 219,6°С (53,4 К) до минус 183,7°С (89,3 К) и давления от 1,67 мм рт. ст. (222,65 Па) до 1219,81 мм рт. ст. (162,63 кПа) описывается уравнением:

$$\lg P = 0,053158 - \frac{2,679663}{T} - \frac{9,87 \cdot 10^{10}}{T^8} \text{ [Па]}. \quad (1.7)$$

Фтор образует соединения практически со всеми химическими элементами, кроме гелия и неона. Взаимодействие фтора с кислородом является эндотермическим процессом, протекание которого возможно лишь в электрическом разряде, в то время как процессы взаимодействия со всеми другими элементами – экзотермические.

При соединении фтора с влагой и маслами выделяется большое количество тепла, при попадании значительных количеств фтора в масло вакуумных насосов может произойти его загорание со взрывом [16].

Фтор реагирует с водой по реакции:



Хлор взаимодействует со фтором, иногда с взрывом, после предварительного нагрева до температуры от 200 до 500°С (от 473 до 773 К). Весьма энергично фтор взаимодействует с металлами. Свинец, уран и ванадий реагируют с фтором при комнатной температуре, а щелочные и щелочноземельные металлы и таллий в этих условиях самовоспламеняются. При незначительном нагревании загораются во фторе висмут, олово титан, молибден и вольфрам.

Энергично взаимодействуют с нагретым фтором платиновые металлы. Металлы подгруппы меди и железа также превращаются во фториды при

нагревании. Устойчивость некоторых металлов к действию фтора при низкой температуре объясняется использованием плотной плёнки нелетучего фторида. Прочные плёнки образуются на поверхности железа, меди, магния, и, особенно никеля и монель–металла. Поэтому из стали можно изготавливать трубопроводы и сосуды для фтора, которые используются при комнатной температуре). Никель, покрытый фтористым никелем, не подвержен действию фтора при температурах менее 600°C (менее 873 K) [16].

#### 1.1.4 Трифторид хлора

Трифторид хлора – бесцветный газ, в твёрдом состоянии имеет белый цвет с жёлтым оттенком.

Таблица 1.4 – Физические свойства трифторида хлора

Температура плавления	минус 83°C (190 K)
Температура кипения	11°C (284 K)

Зависимость давления насыщенного пара  $\text{ClF}_3$  от температуры описываются уравнением:

$$\lg P = 7,42 - \frac{1292}{T} \text{ [Па]}. \quad (1.9)$$

Наиболее важным химическим свойством  $\text{ClF}_3$  является сильное окисляющее действие, оказываемое им почти на любые химические вещества.  $\text{ClF}_3$  вступает во взаимодействие со всеми металлами. Протекание данных реакций при низких температурах приводят к образованию защитной плёнки фторида, которая предотвращает дальнейшую реакцию. В связи с этим в работе с  $\text{ClF}_3$  наиболее применимы медь, никель, сталь. В отсутствие защитной плёнки реакции с металлами протекают бурно, особенно при образовании в результате реакций легколетучих фторидов металлов ( $\text{MoF}_6$ ,  $\text{WF}_6$ ).

Среди неметаллов только благородные газы, азот и кислород не вступают в реакцию с  $\text{ClF}_3$ . Остальные элементы в отличие от металлов не образуют фторидной плёнки и бурно реагируют с  $\text{ClF}_3$  уже при комнатной

температуре [16]. Трифторид хлора и продукты его разложения чрезвычайно агрессивные вещества, соединяющиеся с органическими веществами (маслом, хлопчатобумажными тканями и т. п.) с загоранием, иногда со взрывом. Трифторид хлора бурно реагирует с водой с образованием HF, OF<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>.

На разделительных предприятиях ClF<sub>3</sub> используется в цехах КИУ для обработки основного оборудования с целью снятия коррозионных отложений с внутренних полостей оборудования. Протекающие реакции (при температуре от 50 до 150°C (от 323 до 423 K) описываются уравнениями [17]:



Трифторид хлора и некоторые продукты его разложения при температуре жидкого азота переходят в твёрдое состояние. При размораживании в закрытых объёмах до температуры 20°C (293 K) некоторые продукты разложения ClF<sub>3</sub> значительно повышают давление.

### 1.1.5 Аммиак

Наличие аммиака в технологической цепочке обусловлено его применением при продувке трубопроводов перед их ремонтом.

Жидкий NH<sub>3</sub> – хороший растворитель для большого числа органических, а также для многих неорганических соединений. NH<sub>3</sub> хорошо растворяется в воде, спирте, эфире и других органических растворителях.

В природе образуется при разложении азотсодержащих органических соединений, синтезируется из азота и водорода. По физиологическому действию на организм аммиак относится к группе веществ удушающего и нейротропного действия, способных при ингаляционном поражении вызвать токсический отёк лёгких и тяжёлое поражение нервной системы, обладает как местным, так и резорбтивным действием. Максимальная разовая концентрация в атмосфере составляет 0,2 мг/м<sup>3</sup>. В воздухе рабочей зоны

производственного помещения предельно допустимая концентрация составляет 20 мг/м<sup>3</sup>.

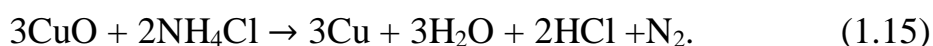
Таблица 1.5 – Физические свойства NH<sub>3</sub> при атмосферном давлении [18]

Температура затвердевания	минус 77,73°C (195,27 K)
Температура сжижения	минус 33,34°C (239,66 K)
Критическое давление	85507,03 мм рт. ст. (11,4 МПа)
Критическая температура	132,25°C (405,25 K)
Теплота плавления	6 кДж/моль

Давление газообразного NH<sub>3</sub> аппроксимируется формулой [19, 20]:

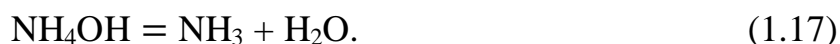
$$P = \left( \left( \frac{T}{6,46342 \cdot 10^{-7}} \right)^{1/8} - 10,7732 \right)^8 \text{ [кПа]}. \quad (1.14)$$

При нагревании аммиак разлагается, проявляет восстановительные свойства. Восстановительная способность NH<sub>3</sub> основана на использовании нашатыря NH<sub>4</sub>Cl для очистки металлических поверхностей от оксидов при их пайке:



Реагируя с галогенами, аммиак образует опасные взрывчатые вещества: трихлорид азота (NCl<sub>3</sub>) и нитрид трийода (NI<sub>3</sub>).

При температурах порядка ~10<sup>3</sup> °C аммиак вступает с реакцию с углём, образуя HCN и частично разлагается на водород и азот. Образование синильной кислоты также происходит при взаимодействии NH<sub>3</sub> с метаном:



### 1.1.6 Углекислый газ

С воздухом в оборудование может поступать углекислый газ (CO<sub>2</sub>), имеющий при температуре минус 5,3°C (267,7 K) упругость



паров 22,066 мм рт. ст. (2,942 кПа).

Двуокись углерода – бесцветный газ, не имеющий запаха при низких концентрациях. При достаточно высоких концентрациях имеет характерный острый, кислый запах. Плотность при нормальных условиях составляет 1,98 кг/м<sup>3</sup>, следовательно, CO<sub>2</sub> тяжелее воздуха в 1,5 раза.

Критическая точка CO<sub>2</sub> составляет 31,1°C (304,1 K) и 55334 мм рт. ст. (7,3773 МПа). Тройная точка CO<sub>2</sub> достигается при температуре минус 56,5°C (216,5 K) и давлении 3885 мм рт. ст. (0,518 МПа).

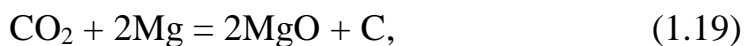
При температуре ниже температуры сублимации (минус 78,5°C (194,5 K)), углекислый газ кристаллизуется в виде так называемого «сухого льда». Жидкая двуокись углерода может быть получена путём повышения давления. Таким образом, при температуре 20°C (293 K) и давлении свыше 45600 мм рт. ст. (6,08 МПа) углекислый газ конденсируется в бесцветную жидкость.

Давление газообразного CO<sub>2</sub> рассчитывается по формуле [21]:

$$P = P_{kr} \exp \left( \frac{T_{kr}}{T} \cdot \left[ \sum_{i=1}^4 a_i \left( 1 - \frac{T}{T_{kr}} \right)^{t_i} \right] \right) [\text{МПа}], \quad (1.18)$$

$$a_1 = -7,0602087, \quad a_2 = 1,9391218, \quad a_3 = -1,6463597, \quad a_4 = -3,2995634, \\ t_1 = 1,0, \quad t_2 = 1,5, \quad t_3 = 2,0, \quad t_4 = 4,0.$$

Углекислый газ не поддерживает горения, но в его атмосфере активные металлы могут гореть, например, щелочные металлы и щелочноземельные – барий, кальций, магний.



### 1.1.7 Физические свойства других примесей

Поступающий с сублиматного производства UF<sub>6</sub> может содержать следующие летучие фториды, которые трудно отделить: тетрафторид кремния (SiF<sub>4</sub>), пентафторид ванадия (VF<sub>5</sub>), пентафторид фосфора (PF<sub>5</sub>),

гексафторид молибдена ( $\text{MoF}_6$ ).

Тетрафторид кремния и пентафторид фосфора более летучи, чем  $\text{UF}_6$  при температуре минус  $2^\circ\text{C}$  (271 К) они имеют упругость паров 29,425 мм рт. ст. (3923 Па). Пентафторид ванадия и гексафторид молибдена летучи примерно, так же, как и  $\text{UF}_6$ , при температуре  $10^\circ\text{C}$  имеют упругость пара 150...600 мм рт. ст. (20...80 кПа).

В оборудование также могут поступать фторэтилен, имеющий при температуре  $72,2^\circ\text{C}$  (345,2 К) упругость паров 735 мм рт. ст. (98,07 кПа) и другие органические соединения.

Кислород при температуре кипения минус  $183^\circ\text{C}$  (90 К) и давлении 760 мм рт. ст. (101,3 кПа) переходит в жидкую фазу, а затвердевает при температуре минус  $218,8^\circ\text{C}$  (54,2 К). При температуре минус  $196^\circ\text{C}$  (77 К) упругость пара кислорода ~150 мм рт. ст. (20 кПа).

Азот при температуре кипения минус  $195,8^\circ\text{C}$  (77,2 К) и давлении 1031,6 мм рт. ст. (137,5 кПа) переходит в жидкое состояние, при температуре минус  $210^\circ\text{C}$  (63 К) затвердевает.

Гексафторид урана и примеси имеют различную упругость паров. Это свойство используется при очистке  $\text{UF}_6$  от лёгких примесей в процессе ожижения и при низкотемпературной «тренировке».

## **1.2 Анализ процессов десублимации $\text{UF}_6$**

Значительную роль в атомной отрасли занимает сублиматное производство. Авторы различных работ [22, 23], посвящённых сублимации, рассматривают этот процесс отдельно от десублимации. Вместе с тем, эти процессы взаимосвязаны, поскольку выбор метода и условий процесса десублимации зависит от условий, при которых протекает сублимация. Взаимосвязь обоснована тем, что эти процессы целесообразней организовывать не в отдельных устройствах, расположенных на расстоянии и соединённых через трубопроводы, а в виде одного агрегата с едиными

внешними факторами (давлением, средой).

Химико-технологическая схема по производству  $UF_6$  состоит из следующих стадий (рисунок 1.2):

- высокотемпературное фторирование техническим фтором урансодержащих соединений, подаваемых из аппаратов улавливания;
- десублимация  $UF_6$ ;
- улавливание ценных фторсодержащих газовых компонентов (избыточный  $F_2$ , остаточный  $UF_6$  и  $HF$ ).

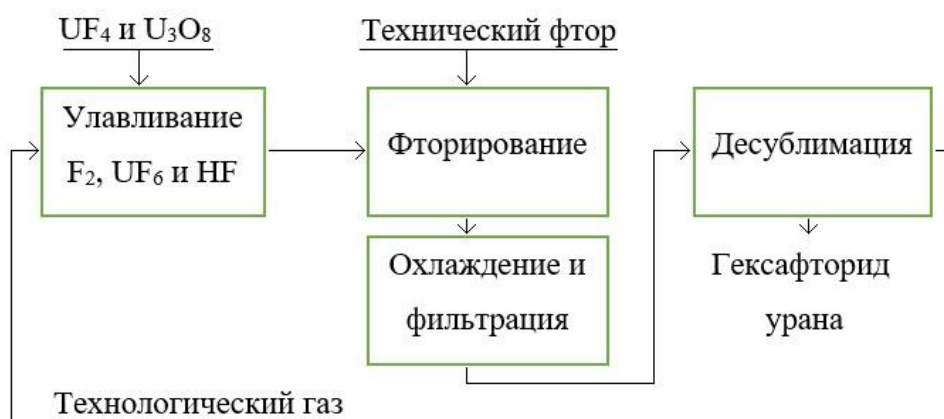


Рисунок 1.2 – Основные стадии сублиматного производства  $UF_6$

В разных странах атомной промышленности используют различные виды десублиматоров: вертикальные, горизонтальные, с паровым и электрическим обогревом.

### 1.2.1 Особенности десублимации $UF_6$ на разделительных предприятиях

Первая особенность процесса десублимации на разделительных заводах заключается в более низкой, по сравнению с десублимацией на сублиматных заводах, температуре выхода газообразного  $UF_6$  из разделительного каскада от 20 до 30°C (от 293 до 303 K). Второй особенностью является наличие в гексафториде урана небольшого количества лёгких примесей, которые содержатся в исходном сырье или поступают в оборудование из атмосферного воздуха из-за его неполной герметичности.

В результате обогащения урана на газовых центрифугах содержание лёгких примесей в обеднённом, по изотопу  $^{235}\text{U}$ , конце каскада минимально, за счёт их смещения в сторону отбора. Перед десублимацией обогащённый поток подвергают очистке от примесей на очистительных каскадах, на выходе которых содержание не превышает  $5 \cdot 10^{-3}\%$  объёма [24, 25].

Перечисленные особенности позволяют осуществлять процесс десублимации  $\text{UF}_6$  непосредственно в транспортные ёмкости.

### 1.2.2 Аппаратурное оформление процессов десублимации

В АО «АЭХК», г. Ангарск десублимация  $\text{UF}_6$  осуществляется в горизонтальных транспортных ёмкостях (рисунок 1.3). Вода подаётся из устройства (1), орошает поверхность ёмкости и, частично испаряясь, стекает по боковым стенкам в поддон (3). Не сконденсированные примеси отводятся из ёмкости через патрубок (4).

Также ёмкости данного типа представляют интерес, так как используются для транспортировки и хранения десублимированного  $\text{UF}_6$  на предприятиях атомной отрасли в зарубежных странах. В настоящее время Росатом активно развивает экологическую политику, ориентированную на максимальное использование потенциала добытых природных ресурсов без увеличения объёмов выработки месторождений: максимально полного извлечения  $^{235}\text{U}$  из сырья, безопасного обращения и ОГФУ, рецикла ценных продуктов переработки ОЯТ.

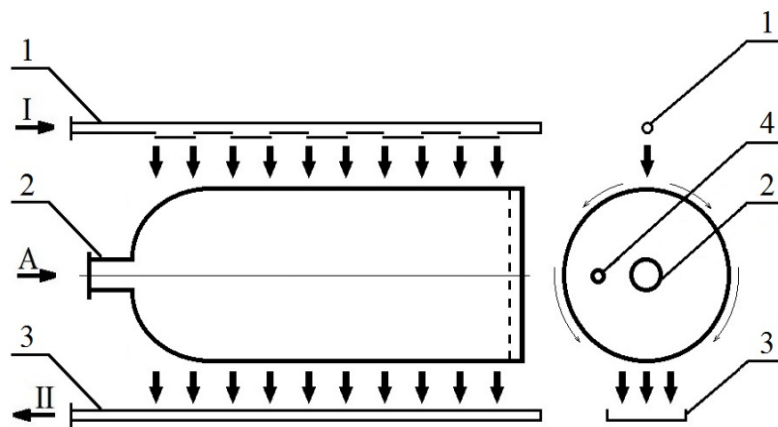


Рисунок 1.3 – Горизонтальная транспортная ёмкость [26]

Обеднённый гексафторид урана, образуемый при разделении изотопов урана, можно повторно загружать и дообогащать в газовых центрифугах. Для Германии это - огромнейшие траты. Технология переработки ОГФУ реализована в АО «ПО «Электрохимический завод» г. Зеленогорска и позволяет переводить его в более безопасную для длительного хранения закись-окись урана. В связи с этим, немецкая компания Urenco начала ввозить на территорию Российской Федерации контейнеры с ОГФУ, содержание в котором изотопа  $^{235}\text{U}$  на порядок больше, чем в природном уране.

На разделительных заводах атомной отрасли Российской Федерации для десублимации обогащённого и обеднённого  $\text{UF}_6$  наиболее распространено применение вертикальных погружных ёмкостей [27] без оребрения или с внутренним горизонтальным или вертикальным оребрением. Горизонтальные ребра применяются в некоторых отборных и промежуточных ёмкостях многократного использования, а вертикальные ребра прямоугольной формы в ёмкостях отвала [27].

В АО «СХК», г. Северск для десублимации  $\text{UF}_6$  используются аппараты с тепловым сбросом типа «Зевс» совместно с погружными вертикальными ёмкостями (рисунок 1.4) [28].

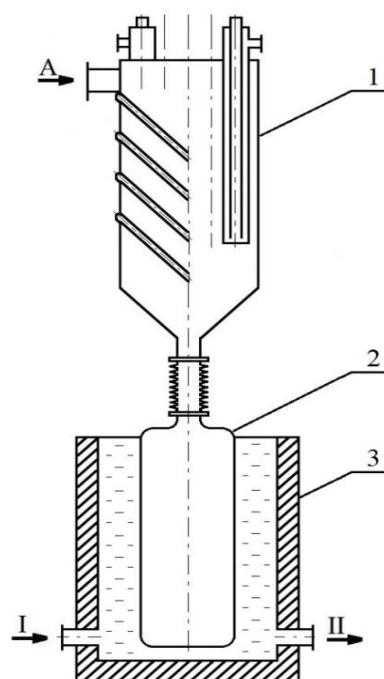


Рисунок 1.4 – Аппарат с тепловым сбросом

Десублимат сыпается из аппарата (1) в вертикальную погружную ёмкость (2), расположенную в термостате (3). Термостат заполнен насыщенным раствором  $\text{CaCl}_2$ , охлаждённым до минус  $20^\circ\text{C}$  (253 K).

Недостатком является повышенная энергоёмкость, а также то, что аппараты с тепловым сбросом типа «Зевс» обеспечивают заполнение ёмкости только до 54% её объёма, после чего заполнение ёмкости осуществляется только погружным способом [29, 30].

Комбинированные десублиматоры по сравнению с ёмкостями, применяемыми на других заводах, обладают более высокой производительностью.

Процесс десублимации проводят в теплообменных аппаратах. Теплоносители, применяемые для термостатирования ёмкости десублиматора, бывают жидкими и газообразными [4, 22-23, 28].

Например, в качестве жидкого теплоносителя могут быть использованы:

- холодная вода с температурой от  $0$  до  $10^\circ\text{C}$  (от 273 до 283 K);
- рассол (насыщенный раствор  $\text{CaCl}_2$ ) минус  $20^\circ\text{C}$  (253 K);
- тосол минус  $60^\circ\text{C}$  (213 K);
- жидкий азот минус  $196^\circ\text{C}$  (77 K).

В качестве газа применяют воздух, фреон.

Принцип охлаждения ёмкостей в данной работе представлен на рисунке 1.5.

Ёмкость помещается в термостат и заполняется, охлаждённым до минус  $25^\circ\text{C}$  (248 K), насыщенным раствором  $\text{CaCl}_2$ . Затем через входной клапан ёмкости подаётся поток газообразного  $\text{UF}_6$ , который десублимируется на её стенках в результате процессов тепло- и массопереноса.

Охлаждение  $\text{UF}_6$  и  $\text{HF}$  позволяет разделять газовую смесь, т.к. гексафторид урана десублимируется на стенках аппарата, а фтористый водород переходит в жидкую фазу, стекает вниз и отбирается отсосным патрубком лёгких примесей ёмкости.

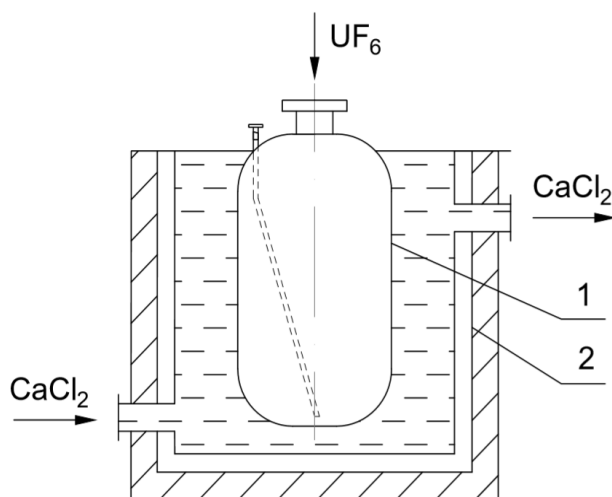


Рисунок 1.5 – Схема охлаждения вертикальных емкостей

1 – охлаждаемая емкость, 2 – термостат

Термодинамический подход является основой для расчёта тепло- и массообмена в установках для десублимации и определения необходимых и достаточных условий термостатирования ёмкости.

### 1.2.3 Конденсационно-испарительные установки разделительных производств

Подача сырьевого  $\text{UF}_6$  в каскад разделительного производства, а также приём обогащённого и обеднённого по изотопу  $^{235}\text{U}$  гексафторида урана осуществляется в конденсационно-испарительных установках.

В состав КИУ разделительных производств входят:

- коллектор питания (К-01), в котором осуществляется сублимация твёрдого  $\text{UF}_6$  из транспортных ёмкостей, работает с ёмкостями объёмом 2,5 и 4,0 м<sup>3</sup>, нагрев индукционный (2,5 м<sup>3</sup>) или воздушный (4,0 м<sup>3</sup>);

- коллектор подпитки, в котором испаряется твёрдый регенерированный  $\text{UF}_6$  или отвальный  $\text{UF}_6$  с повышенным содержанием  $^{235}\text{U}$ , а затем подаётся в ступень каскада центрифуг с близкой изотопной концентрацией;

- коллектор отбора (К-02), в котором осуществляется десублимация обогащённого  $\text{UF}_6$  в транспортные ёмкости, работает с ёмкостями объёмом

0,8 и 1,0 м<sup>3</sup>, охлаждение ёмкостей осуществляется рассолом;

- коллектор отвала (К-03), в котором осуществляется десублимация обеднённого UF<sub>6</sub> в транспортные ёмкости, работает с ёмкостями объёмом 2,5 и 4,0 м<sup>3</sup>, охлаждение ёмкостей осуществляется рассолом;

- установка промежуточных ёмкостей (К-08), охлаждаемых до различной температуры, для ступенчатой конденсации UF<sub>6</sub>, F<sub>2</sub>, HF (используется в АО «СХК»);

- установка осадителей (К-09), в которых улавливаются проскоки UF<sub>6</sub> и фтористых соединений, предназначена для подготовительных операций с ёмкостями на коллекторах К-01, К-02, К-03; в её состав входят установки РИФ, осадительные ёмкости, химпоглотители, насосы;

- коллектор размораживания осадителей;

- коллектор испарения осадителей;

- очистительные установки, предназначенные для очистки потоков UF<sub>6</sub> от лёгких примесей;

- промывочная система, предназначенная для воздушной промывки внутренних полостей технологического оборудования при замене ёмкостей или ремонте оборудования;

- коллектор переконденсации дефектных ёмкостей, в котором UF<sub>6</sub> испаряется из дефектных ёмкостей и конденсируется в исправные ёмкости;

- установка по извлечению нелетучих остатков урана из ёмкостей (используется в АО «ПО ЭХЗ»).

Основными технологическими операциями, которые осуществляются на установках КИУ, являются:

- Сублимация UF<sub>6</sub>, которая осуществляется в коллекторах питания и подпитки для непрерывного питания каскада газовых центрифуг (ГЦ). Также сублимация применяется в коллекторе размораживания осадителей (ОС) для удаления из них газов, имеющих при комнатной температуре давление насыщенных паров выше атмосферного, и в коллекторе переконденсации ёмкостей при освобождении дефектных ёмкостей от твёрдого UF<sub>6</sub>.



– Десублимация  $UF_6$ , используется в коллекторах отбора и отвала для непрерывного перевода в твёрдое состояние обогащённой фракции (отбора) и обеднённой фракции (отвала) каскада ГЦ. Кроме того, десублимация  $UF_6$  протекает в промежуточных ёмкостях, в которых происходит извлечение  $UF_6$  из газовых смесей с целью возвращения его в технологическую цепочку, и в ОС, предназначенных для исключения проскоков  $UF_6$ , конденсации HF и защиты вакуумных насосов.

Для сублимации и десублимации  $UF_6$  в цехах КИУ разделительных производств используется технологическая тара – ёмкости объёмом  $4,0\text{ м}^3$ ,  $2,5\text{ м}^3$ ,  $1,0\text{ м}^3$ ,  $0,8\text{ м}^3$ ,  $0,76\text{ м}^3$ ,  $5,0 \cdot 10^{-2}\text{ м}^3$ ,  $2,4 \cdot 10^{-2}\text{ м}^3$ ,  $1,2 \cdot 10^{-2}\text{ м}^3$ ,  $6,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$ .

С целью обеспечения необходимого режима работы коллекторов несколько ёмкостей в них могут включаться одновременно или по мере заполнения одной ёмкости в работу включаются последующие ёмкости через различные промежутки времени. Это обеспечивает возможность замены отработавших ёмкостей, не прерывая технологический процесс разделительного производства.

Количество ёмкостей в каждом из коллекторов определяется расходом газа, производительностью одной ёмкости, необходимым резервом для обеспечения нормальной работы коллектора (возможности ремонта отдельных узлов, замены заполненных (пустых) ёмкостей на пустые (заполненные) и т. д.).

Межкаскадные коммуникации (МКК) соединяются с соответствующими магистральными коллекторами, к которым через отводы секционных коллекторов подсоединяются ёмкости. Помимо секционного коллектора к каждой ёмкости также подключается отвод отсосной линии.

Отсосные линии необходимы для откачки отводов и вновь установленных пустых ёмкостей на коллекторах десублимации, а также «тренировки» ёмкостей перед включением их на испарение. К отводам ёмкостей на коллекторах питания, отбора и отвала также подсоединяется линия воздушной промывки, по которой осуществляется промывка отводов

перед заменой ёмкостей. Для надёжного отсечения ёмкостей от коллекторов и отсосных линий на отводах перед ёмкостями последовательно устанавливаются два и более клапана.

Операции по откачке отводов, ёмкостей и прокачке коллекторов в цехах КИУ разделительных производств осуществляются вакуумными насосами, при этом с целью защиты от проскоков агрессивных газов перед вакуумными насосами устанавливаются колонки с химическими поглотителями.

В процессе эксплуатации установок КИУ необходимо контролировать следующие технологические параметры:

- давление в коллекторах и линиях МКК;
- наличие и величину «натечек» лёгких примесей в газовых потоках;
- температуру нагрева, охлаждения ёмкостей, воздуха в помещении;
- положение клапанов на линиях МКК и коллекторах;
- давление в нулевых линиях и линиях сжатого воздуха;
- наличие расхода газа на ёмкостях коллектора питания и подпитки;
- наличие напряжения на приборах и установках;
- вес ёмкостей, работающих с десублиматорами теплового сброса.

Контроль указанных параметров осуществляется с помощью:

- МС-4А, СВ-1А для дистанционного измерения давления;
- ОМ-6, СМ-4А, мановакуумметры для местного измерения давления;
- МС-4А, ДР-6М, электроконтактные вакуумметры (ЭКВ), электроконтактные манометры (ЭКМ) для сигнализации отклонения давления от заданной величины, а также в схемах защиты и автоматики;
- газоанализаторы примесей ГАГМ для определения количества лёгких примесей;
- термометры сопротивления (ТСМ) для контроля температуры нагрева и охлаждения ёмкостей, температуры воздуха в помещении;
- датчик расхода газа РГ-1М для осуществления контроля потока

в линии испарения ёмкостей на коллекторе питания.

Основные требования технологического процесса на коллекторах отбора и отвала:

- обеспечение непрерывной десублимации потоков отбора и отвала;
- поддержание (регулирование) давления в коллекторе;
- своевременная замена заполненных ёмкостей и подготовка резервных (пустых) для включения в работу на коллекторах отбора и отвала;
- поддержание схем технологического контроля в работоспособном состоянии;
- поддержание в заданных пределах температуры рассола.

Ёмкости на коллекторах отбора и отвала могут находиться в восьми основных состояниях:

- 1) ёмкость установлена в термостат, но не подсоединена к отводам коллекторов десублимации и откачки;
- 2) ёмкость подсоединена к отводам коллекторов десублимации и откачки, но отводы не откачаны;
- 3) ёмкость подсоединена, отводы проверяются на вакуумную плотность;
- 4) отводы проверены на вакуумную плотность, проверяется на вакуумную плотность фланцевое соединение патрубка ёмкости с коллектором;
- 5) ёмкость принята по вакуумной плотности;
- 6) ёмкость готова к включению в работу;
- 7) ёмкость включена в работу на десублимацию;
- 8) ёмкость выключена из работы, но не отсоединена.

На коллектор отбора для подготовки к работе могут поступать следующие ёмкости: чистые после промывки, новые с завода-изготовителя, пустые с нелетучим остатком после установок перелива, б/у от внешних потребителей с остатком UF<sub>6</sub>, ёмкости, имеющие не полное заполнение.

На коллектор отвала для подготовки к работе могут поступать

следующие ёмкости: новые; пустые ёмкости б/у, промытые и не промытые для повторного заполнения отвальным  $UF_6$ ; ёмкости, имеющие заполнение ниже установленной минимальной величины, для дозаполнения.

Количество одновременно работающих на коллекторах отбора и отвала ёмкостей и время их заполнения определяется величиной потока газообразного  $UF_6$ . При подключении ёмкостей к коллекторам и включении их в работу должны выполняться следующие условия:

- количество резервных ёмкостей на каждом из коллекторов должно быть по возможности не меньше количества ёмкостей, находящихся в работе;
- на коллекторе отбора должна быть хотя бы одна резервная ёмкость, в которую можно подать некондиционный поток отбора;
- максимальное давление в коллекторе отбора не должно превышать 80 мм рт. ст. (13,3 кПа), в коллекторе отвала 120 мм рт. ст. (16 кПа).

Заполнение ёмкостей товарным  $UF_6$  не должно превышать следующих значений: для ёмкостей объёмом 1,0 м<sup>3</sup> 3090 кг (ограничение связано с требованиями ядерной безопасности); для ёмкостей объёмом 0,8 м<sup>3</sup> 2400 кг; при заполнении ёмкостей отвальным  $UF_6$  для безрёберных ёмкостей объёмом 2,5 м<sup>3</sup> 9500 кг (ограничение связано со снижением скорости десублимации  $UF_6$  по мере заполнения ёмкости), для оребрённых ёмкостей объёмом 2,5 м<sup>3</sup> 10500 кг (ограничение обусловлено необходимостью обеспечения целостности ёмкости в случае перехода десублимированного  $UF_6$  в жидкую фазу).

Если масса заполненной ёмкости превышает указанные выше значения, излишки  $UF_6$  из неё удаляются путём переконденсации. Кроме того, переконденсация проводится по следующим причинам:

- получение товарного  $UF_6$  с заданной концентрацией изотопа  $^{235}U$  путём смешивания расчётных количеств  $UF_6$  с разными концентрациями изотопа  $^{235}U$ ;
- получение заданного веса группы ёмкостей товарной партии;
- освобождение ёмкостей от  $UF_6$  при невостребованности товарного

продукта или под продукт другой концентрации изотопа  $^{235}\text{U}$  в условиях дефицита этих ёмкостей;

- освобождение ёмкостей от  $\text{UF}_6$  при выявлении дефектов на ёмкости.

Переконденсация  $\text{UF}_6$  может проводиться на любой точке коллектора отбора с использованием штатных и временных отводов для подсоединения к коллекторам десублимации и откачки.

В процессе переконденсации необходимо осуществлять контроль давления в линии переконденсации, давление в коллекторе отбора не должно превышать 80 мм рт. ст. (13,3 кПа) и 120 мм рт. ст. (16 кПа) в коллекторе отвала. Во избежание десублимации  $\text{UF}_6$  в линии трубопроводов коллектора, необходимо проверять их проходимость. Для проверки проходимости трубопроводов необходимо закрыть клапан на ёмкости, из которой испаряется  $\text{UF}_6$ , при этом давление в трубопроводе должно уменьшиться до давления упругости насыщенных паров  $\text{UF}_6$  при температуре ёмкости, в которую проводится десублимация. Если давление изменяется незначительно, линию переконденсации необходимо прокачать в отсосную линию для удаления накопившихся лёгких примесей и возобновить процесс переконденсации. После переконденсации ёмкости взвешиваются и в дальнейшем используются по назначению.

Для исключения десублимации  $\text{UF}_6$  в входных клапанах ёмкостей (их «перемерзания»), в которых происходит процесс десублимации, на горловину ёмкостей возможна установка временных переносных нагревателей.

Секции коллектора отбора могут иметь следующее назначение:

- десублимация различных потоков отбора из технологической цепочки (потоки различных концентраций и марок гексафторида урана);

- использование в качестве отсосной системы (точка аварийного сброса и точка предварительных промежуточных ёмкостей (ППЕ));

- выполнение работ по переконденсации  $\text{UF}_6$  из испарителей;

- замер давления в товарных ёмкостях.

## **1.2.4 Способы охлаждения и нагрева, применяемые в конденсационно-испарительных установках**

### **1.2.4.1 Охлаждение**

Охлаждение ёмкостей осуществляется на коллекторах отбора, отвала, ППЕ, промежуточных ёмкостях (ПЕ) и ОС. В зависимости от назначения коллектора и заданных рабочих параметров ёмкости охлаждаются рассолом (насыщенный водный раствор  $\text{CaCl}_2$ ), холодным воздухом, «сухим льдом» или жидким азотом.

Охлаждение ёмкостей на коллекторах отвала и отбора, а также ППЕ до температур от минус 15 до минус 25°C (от 248 до 258 К) осуществляется в специальных термостатах рассолом, имеющим плотность не менее 1,25 г/см<sup>3</sup>, что соответствует содержанию 350 г  $\text{CaCl}_2$  в 1 л раствора. Рассол подаётся через патрубок в нижней части термостата, а сливается через патрубок в верхней части. Охлаждение рассола осуществляется с помощью фреоновых холодильных машин.

В состав рассольной системы входят:

- фреоновая установка;
- магистральные трубопроводы подачи и слива рассола;
- стационарные термостаты для размещения ёмкостей объёмом 1,0 и 0,8 м<sup>3</sup> на коллекторе отбора;
- стационарные термостаты для размещения ёмкостей объёмом 2,5 м<sup>3</sup> на коллекторе отвала;
- насосы для перекачки и циркуляции рассола.

Коллектор ПЕ охлаждается холодным воздухом до температуры от минус 60 до минус 80°C (от 193 до 213 К). Ёмкости устанавливаются в термостаты воздушного охлаждения, к которым через вентили подводится холодный воздух от магистральных трубопроводов [31–33], идущих с воздушной холодильной машины (ВХМ). Ёмкости коллектора ПЕ могут работать в режиме десублимации, «тренировки», испарения, а также

находиться в состоянии резерва.

Коллектор ОС охлаждается жидким азотом до температуры минус 196°C. В стационарные термостаты устанавливаются ёмкости объёмом  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ , в которые из переносных дьюаров заливают жидкий азот.

Уровень жидкого азота во время работы ОС должен поддерживаться как минимум на 1/3 высоты ёмкости. В ОС конденсируются проскоки  $\text{UF}_6$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{PF}_5$ ,  $\text{POF}_3$ ,  $\text{ClF}_3$  и другие примеси, в некоторых случаях, при больших давлениях, не исключается конденсация (накопление в жидкой фазе) кислорода.

#### **1.2.4.2 Нагрев**

Нагрев ёмкостей объёмом  $2,5 \text{ м}^3$  осуществляется индукторами, ёмкости объёмом  $1,0 \text{ м}^3$ ,  $0,8 \text{ м}^3$  нагреваются воздухом. Индуктор представляет собой совокупность электромагнитов, индуцирующих в стенках ёмкости вихревые токи (токи Фуко), которые вызывают нагрев.

Обогрев горловин ёмкостей на коллекторах десублимации осуществляется съёмными омическими нагревателями, которые представляют собой проводник в асбестовой изоляции, нагревающийся при прохождении электрического тока.

Нагрев ёмкостей объёмом  $4,0 \text{ м}^3$  (типа 48Y) осуществляется на специальных подставках омическими нагревателями.

Основными требованиями технологического процесса на коллекторах питания и подпитки является обеспечение непрерывности потока питания, поддержание заданного давления до шайбы регулятора питания (подпитки), поддержание заданных параметров работы точек питания (подпитки): давления и температуры, своевременная замена отработавших ёмкостей и подготовка к включению новых ёмкостей (или резервных), поддержание схем аварийной защиты в работоспособном состоянии.

Ёмкость на коллекторах питания и подпитки может находиться в семи основных состояниях:

1) ёмкость установлена в индуктор соответствующей точки, но не подсоединена к отводу;

2) ёмкость подсоединена к отводу испарения, клапан ёмкости закрыт, опломбирован, отвод проверяется на вакуумную плотность;

3) ёмкость подсоединена к отводу испарения, отвод проверен на вакуумную плотность, ёмкость не прошла «тренировку», клапан ёмкости закрыт, опломбирован;

4) проверка на вакуумную плотность ёмкости и патрубка;

5) ёмкость прошла «тренировку», клапан ёмкости открыт;

6) ёмкость включена в работу на испарение;

7) ёмкость выключена из работы, клапан ёмкости закрыт, но ёмкость не отсоединена от отвода испарения.

Длительность нахождения ёмкости в каждом из состояний зависит от требования технологического процесса.

При включении ёмкостей в работу на испарение должны соблюдаться следующие правила:

– постоянно на коллекторе питания должна быть секция резервных ёмкостей;

– в первую очередь включаются ёмкости на той секции, где уже есть работающие ёмкости, затем приступают к включению ёмкостей на следующей секции.

Для поддержания заданного давления до шайбы необходимо, чтобы давление до регулятора было не менее, чем на 10 мм рт. ст. (1,3 кПа) больше давления до шайбы.

Для исключения конденсации  $UF_6$  в коммуникациях, давление должно быть на 10 мм рт. ст. и более (1,3 кПа) ниже давления упругости паров  $UF_6$  при температуре помещения. При температуре помещения 25°C (298 К) давление в коммуникациях должно быть не более 110 мм рт. ст. (14,6 кПа). При снижении температуры в помещении давление в коллекторе соответственно должно снижаться. Поддержание заданного давления до регулятора питания



обеспечивается включением резервных ёмкостей.

Регулирование давления до шайбы осуществляется с помощью регулятора или его байпасного клапана.

Ёмкости с сырьевым  $UF_6$ , поступающие с сублиматного завода, и ёмкости с отвальным  $UF_6$ , поступающие со склада, перед включением в работу взвешиваются.

На коллекторах питания и подпитки существует три режима управления обогревом ёмкости: регулирование по давлению, регулирование по температуре, ручное управление.

В состав коллекторов питания и подпитки входят следующие основные системы:

- основной и резервный магистральный коллектор испарения;
- секционные коллекторы испарения;
- отводы, соединяющие ёмкости с секционным коллектором испарения (4–7 отвода на каждый секционный коллектор);
- циклоны и фильтры (по два на каждый секционный коллектор);
- система технологического контроля и аварийной защиты.

Коллектора питания и подпитки оснащаются соответствующей запорной арматурой и свободными вентилями для подсоединения переносных приборов контроля, проведения вакуумных испытаний, эжекторной промывки и других необходимых работ.

Секции коллекторов могут быть использованы для испарения в технологическую цепочку ёмкостей питания, испарения в технологическую цепочку ёмкостей с отвальным  $UF_6$ , для испарения продукта марки РТ, при работе в составе РТ-каскада, для переконденсации и испарения  $UF_6$  из ёмкостей 48У.

Система откачки ёмкостей и коллекторов предназначена для:

- удаления из ёмкостей с  $UF_6$  лёгких примесей («тренировка» ёмкостей);
- удаления остатков  $UF_6$  из отвода перед снятием ёмкости

с коллектора;

- улавливания  $UF_6$  и  $HF$  при тренировке ёмкостей;
- прокачки технологических трубопроводов после пассивации;
- проведение вакуумных испытаний;
- фракционной разгонки газовой смеси при всех видах откачки.

В состав системы откачки ёмкостей и коллекторов входят:

- основной и резервный магистральный коллектора откачки питания и подпитки;
- секционные коллекторы откачки (по одному на каждый секционный коллектор испарения);
- циклоны и фильтры (по одному для основного и резервного магистрального коллектора);
- коллектор ППЕ с ёмкостями объёмом  $2,5 \text{ м}^3$ ;
- коллектор ПЕ с ёмкостями объёмом  $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ ;
- коллектор ОС с ёмкостями объёмом  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ ;
- химвсасывающие установки, которые предназначены для защиты вакуумных насосов от проскоков  $UF_6$  и  $HF$ ;
- вакуумные насосы.

Система обогрева ёмкостей предназначена для увеличения скорости испарения  $UF_6$  из технологических ёмкостей, в её состав входят:

- двух- и трехсекционные индукторы коллектора питания;
- схемы контроля КИПиА;
- приборы контроля силы тока и напряжения.

Индукторы на коллекторах питания и подпитки расположены секционно. Каждая секция состоит из четырёх–семи индукторов. Подача напряжения на секцию индукторов осуществляется со щитов управления, отключение обогрева точки (выключение индуктора) может быть выполнено дистанционно или автоматически при срабатывании схем защиты, также предусмотрена возможность его дистанционного аварийного отключения.

Система технологического контроля и аварийной защиты регистрирует величины контролируемых технологических параметров, поддерживает технологические параметры в заданных пределах, а также сигнализирует об отклонении технологических параметров от заданных пределов посредством срабатывания системы аварийной защиты.

Коллектора питания и подпитки имеют следующие виды защиты, отключающие обогрев ёмкостей:

- от перекрытия трассы испарения;
- от перегрева ёмкости;
- от прекращения потока;
- от превышения давления в секции и магистральном коллекторе;
- от снятия напряжения с приборов.

Температура всех нагреваемых ёмкостей контролируется в двух местах – в донной части и горловине ёмкости, для горизонтальной тары контроль температуры осуществляется только в донной части. При достижении аварийной уставки приборов контроля обогрев точки отключается. После этого включение обогрева может быть осуществлено только в ручном режиме.

На отводе каждой ёмкости коллектора питания имеется датчик расхода газа типа РГ-1. Во время работы ёмкости понижение расхода до минимальной величины приведёт к отключению её нагрева, т. к. понижение расхода происходит при окончании работы ёмкости или при закрытии трассы испарения.

Схема защиты от превышения давления срабатывает следующим образом:

- при повышении давления в секционном коллекторе отключается нагрев ёмкостей данной секции;
- при повышении давления в магистральном коллекторе отключается нагрев всех работающих ёмкостей коллектора.

После срабатывания защиты от превышения давления в секции обогрев

включается вручную, а при срабатывании защиты в магистральном коллекторе включение обогрева происходит автоматически при понижении давления.

Отсосная система коллекторов питания и подпитки предназначена для фракционной разгонки газовой смеси и откачки объёмов от воздуха. Для эффективного разделения смеси газов ( $\text{UF}_6$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{MoF}_6$ ,  $\text{PF}_5$  и др.), необходимо поддержание заданных температур и давлений на всех ступенях (ППЕ, ПЕ, ОС), рассмотренных ранее.

## 2. Двухмерная математическая модель процесса десублимации UF<sub>6</sub> в вертикальные погружные ёмкости

### 2.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования выбраны вертикальные погружные ёмкости объёмом 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 и 4,0 м<sup>3</sup> без оребрения и толщиной стенок  $6 \cdot 10^{-3}$  м, представленные на рисунке 2.1.

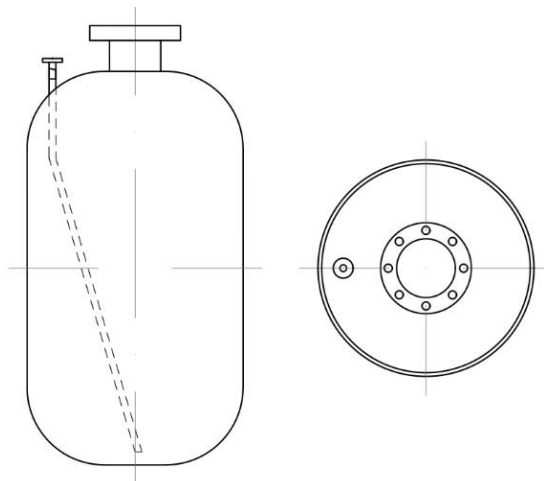


Рисунок 2.1 – Вертикальная погружная ёмкость без оребрения

Процесс десублимации протекает при температуре хладагента (насыщенного раствора CaCl<sub>2</sub>) минус 25°C, при рабочем давлении в коллекторе 80 мм рт. ст. и давлении в ёмкости 4 мм рт. ст.

Геометрические размеры рассматриваемых ёмкостей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Геометрические размеры ёмкостей

Объем ёмкости, $V$ , м <sup>3</sup>	Высота ёмкости, $H$ , м	Радиус ёмкости, $R$ , м	$H/R$
1,0	1,273	0,5	2,546
2,0	1,768	0,6	2,947
2,5	1,884	0,65	2,898
3,0	1,949	0,7	2,784
4,0	2,264	0,75	2,264

На рисунке 2.2 схематично представлена вертикальная погружная ёмкость и соответствующая ей расчётная область.

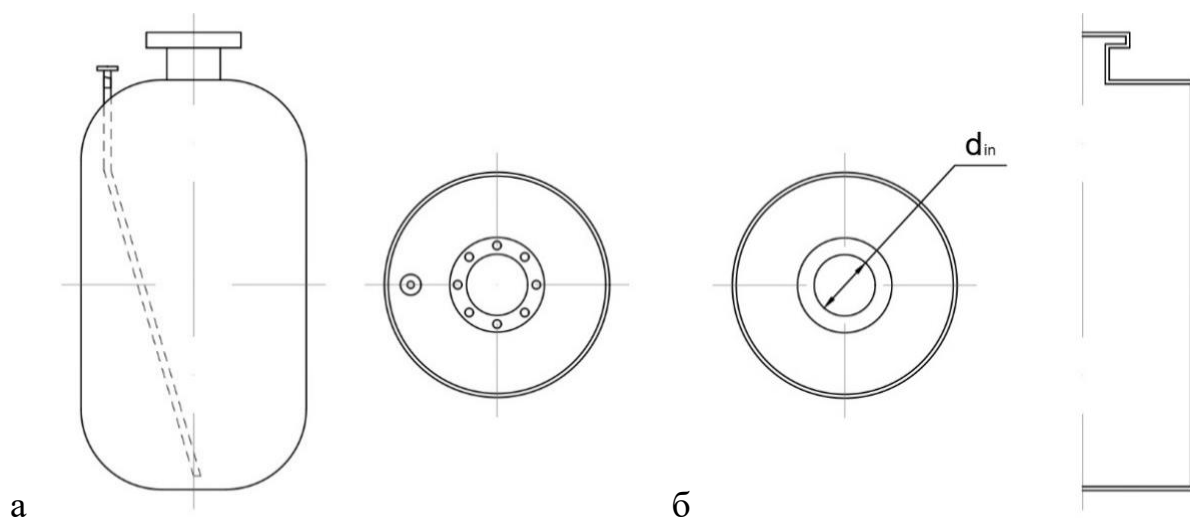


Рисунок 2.2 – Вертикальная погружная ёмкость с гладкими внутренними стенками (а), расчётная область ёмкости (б),  $d_{in}$  – диаметр входного клапана

## 2.2 Математическая модель

Разработанная сотрудниками Отделения ядерно-топливного цикла ИЯТШ ТПУ математическая модель процесса десублимации  $UF_6$  в двухмерной постановке включает систему уравнений газовой динамики для описания течения газовой смеси в объёме ёмкости и уравнение теплопроводности для описания теплообменных процессов между газовой фазой и хладагентом.

Система уравнений для описания протекающего процесса записывалась в дифференциальном виде и решалась методом численного моделирования. Ниже будут рассмотрены принятые допущения и основные уравнения газовой динамики и теплообмена.

## 2.3 Принятые допущения

При построении двухмерной математической модели нестационарного процесса десублимации  $UF_6$  установлены следующие допущения [5-7, 34]:

1. Температура внешних поверхностей ёмкости постоянна и равна температуре хладагента. Температура верхней части ёмкости с входным и

отсосным патрубками равна температуре воздуха в помещении.

2. Десублимация  $UF_6$  происходит только на поверхности боковой и донной стенках ёмкости. Объёмная десублимация газообразного  $UF_6$  не происходит.

3. Температура фазового перехода  $UF_6$  равна равновесной температуре и определяется по давлению газообразного  $UF_6$  над слоем десублимата.

4. В рассматриваемой системе не протекают химические реакции.

5. Всё тепло, выделяющееся при фазовом переходе, отводится хладагентом. Процесс десублимации  $UF_6$  определяется теплоотводом через стенку ёмкости и слой десублимата.

6. Изменение энтальпии газовой смеси при охлаждении её до температуры фазового перехода гораздо меньше теплоты десублимации.

7. В пределах каждой из фаз выполняется гипотеза локального термодинамического равновесия.

## **2.4 Основные уравнения теплообмена и газовой динамики**

В рассматриваемой задаче режим течения газообразного  $UF_6$  является вязким и дозвуковым. Вычисление числа Рейнольдса показало, что  $Re \approx 500$ , в связи с чем течение газообразного  $UF_6$  в ёмкости считали ламинарным, при этом за характерный размер принят радиус ёмкости, скорость газообразного  $UF_6$  определяли по формуле  $U = \bar{q} \cdot S_{emk} / \rho$ , где  $\bar{q}$  – средняя скорость десублимации  $UF_6$ ,  $S_{emk}$  – площадь теплообменной поверхности ёмкости.

Полученные нами ранее изотермы в газообразном  $UF_6$  и стенке ёмкости [35] и вектора скорости движения газообразного  $UF_6$  в ёмкости в различные моменты времени [36] дают представление о характере течения газа, а также показывают, что течение газа имеет вид расширяющейся струи, при этом внутри ёмкости отсутствуют зоны вихревого течения газообразного  $UF_6$ .

Полная система уравнений Навье-Стокса, описывающая движение вязкого газа, имеет вид [37, 38]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + v \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot v, \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial \tau} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P + \rho g - \frac{2}{3} \nabla (\mu \nabla \cdot v) + 2 \nabla \cdot (\mu S), \\ \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot v)^2 + 2 \mu S : S + \beta T \frac{d\rho}{d\tau}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $v$  – вектор скорости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P$  – давление;  $T$  – температура;  $\rho$  – плотность газа;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_p$  – молярная теплоёмкость при постоянном давлении;  $\tau$  – время;  $S$  – тензор скоростей деформаций;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения.

При построении двухмерной математической модели процесса десублимации  $UF_6$  из-за отсутствия зон вихревого течения газообразного  $UF_6$  и малого порядка смешанных производных компонент скорости авторы сочли возможным использование системы уравнений Прандтля в цилиндрической системе координат [39]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v) = 0, \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{w^2}{r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right\} - \frac{\partial P}{\partial r}, \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{uw}{r} + v \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rw) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right\} - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r}, \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g, \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $r, z, \theta$  – переменные цилиндрической системы координат;  $u, v, w$  – проекции вектора скорости на оси  $r, z, \theta$  соответственно.

Уравнение теплопроводности для расчёта температуры стенок ёмкости:

$$c_{mat} \rho_{mat} \frac{\partial}{\partial \tau}(rT) = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{mat} \frac{\partial rT}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{mat} \frac{\partial rT}{\partial z} \right), \quad (2.3)$$

где индекс  $mat$  соответствует параметрам материала стенки ёмкости:

$$\lambda_{mat} = 61 \text{ [Вт/м·К]}, c_{mat} = 86 \text{ [Дж/кг·К]}, \rho_{mat} = 7859 \text{ [кг/м}^3\text{]}.$$



Рассматриваемая задача имеет осевую симметрию, поэтому с учётом принятых допущений движение газообразного  $UF_6$  внутри ёмкости описывали с помощью дивергентной формы системы уравнений Прандтля [39-41]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \tau}(r\rho_{UF}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho_{UF}u) + \frac{\partial}{\partial z}(r\rho_{UF}v) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(r\rho_{UF}u) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho_{UF}u^2) + \frac{\partial}{\partial z}(r\rho_{UF}uv) = -\frac{\partial rP}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\mu_{UF}\frac{\partial ru}{\partial r}\right) + \\ \quad + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{UF}\frac{\partial ru}{\partial z}\right) + \frac{\rho_{UF}uv}{r}, \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(r\rho_{UF}v) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho_{UF}vu) + \frac{\partial}{\partial z}(r\rho_{UF}v^2) = -\frac{\partial rP}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\mu_{UF}\frac{\partial rv}{\partial r}\right) + \\ \quad + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{UF}\frac{\partial rv}{\partial z}\right) + \frac{\rho_{UF}v^2}{r} + r\rho_{UF}g, \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(rc_{pUF}\rho_{UF}T) + \frac{\partial}{\partial r}(rc_{pUF}\rho_{UF}Tu) + \frac{\partial}{\partial z}(rc_{pUF}\rho_{UF}Tv) = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_{UF}\frac{\partial r\rho_{UF}T}{\partial r}\right) + \\ \quad + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{UF}\frac{\partial r\rho_{UF}T}{\partial z}\right). \end{array} \right. \quad (2.4)$$

где индекс  $UF$  соответствует параметрам газообразного  $UF_6$ .

Температурные зависимости для определения теплофизических свойств газообразного  $UF_6$  [42-45]:

$$\mu_{UF} = (1,67 + 0,0044(T - 273)) \cdot 10^{-5}, [\text{Па} \cdot \text{с}], \quad (2.5)$$

$$\lambda_{UF} = 4,184 \cdot 10^{-2} \cdot (1,459 + 0,00614 \cdot (T - 273)), [\text{Вт/м} \cdot \text{К}], \quad (2.6)$$

$$c_{pUF} = 385 + 0,0943 \cdot T - 3810000/T^2, [\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}]. \quad (2.7)$$

На оси симметрии задавали условия симметрии, на боковой и донной стенках ёмкости – скорость движения фазового перехода, определяемая из решения задачи Стефана, описывающей процесс десублимации. Давление во входном патрубке задали равным давлению в коллекторе и температуре газообразного  $UF_6$ .

На внешней и внутренней поверхностях ёмкости завадали граничные условия I-го рода: равенство температуры границы раздела фаз равновесной температуре фазового перехода и равенство температуры внешней поверхности стенки ёмкости температуре хладагента.

С учётом допущения 5, условие Стефана на поверхности раздела

газообразной и твёрдой фаз  $\text{UF}_6$  можно записать как равенство количества тепла, отводимого хладагентом через стенку ёмкости и слой десублимата, и количества тепла, выделяемого в результате фазового перехода  $\text{UF}_6$  из газообразного состояния в твёрдое [40]:

$$v_w(\tau) \rho_u L_{UF} = \frac{\lambda_u r}{l_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2.8)$$

$$L_{UF} = -16700 + 624,176 \cdot T - 0,9131335 \cdot T^2 + 16267677,3/T, \text{ [Дж/кг]} \quad (2.9)$$

где  $v_w(\tau)$  – скорость фазового перехода  $\text{UF}_6$ ;  $\rho_u$  – плотность десублимированного  $\text{UF}_6$ ;  $L_{UF}$  – теплота фазового перехода  $\text{UF}_6$ ;  $\lambda_u$  – теплопроводность десублимированного  $\text{UF}_6$ ;  $l_w(\tau)$  – граница фазового перехода  $\text{UF}_6$ ;  $n$  – нормаль к поверхности теплообмена.

Система уравнений (3-5) решалась численно методом контрольного объёма с использованием алгоритма SIMPLE [45-49]. Верификация разработанной и программно реализованной двухмерной математической модели на задаче тепловой гравитационной конвекции газообразного  $\text{UF}_6$  в вертикальной цилиндрической ёмкости при наличии источника тепловыделения постоянной температуры в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой [35] и на задаче о течении жидкости в каверне с подвижной крышкой [50] показала, что реализованная программа адекватно описывает как газодинамические, так и теплообменные процессы.

Проведённые ранее расчёты влияния температуры хладагента и давления в коллекторе десублимации [5], отношения высоты ёмкости к её радиусу [6], толщине вертикальных и горизонтальных рёбер ёмкости, их количества и размеров [51, 52] на среднюю производительность вертикальных погружных ёмкостей различного объёма показали возможность повышения эффективности процесса десублимации  $\text{UF}_6$  за счёт изменения конструкции ёмкостей и режима их работы.

### 3. Результаты исследований и их обсуждение

Исследование влияния температуры газообразного  $\text{UF}_6$  и диаметра входного клапана ёмкостей на динамику заполнения ёмкостей десублимированным  $\text{UF}_6$  до 70% их свободного объёма проводили в ёмкостях объёмом 1,0...4,0 м<sup>3</sup> с давлением в начальный момент заполнения равным 4 мм рт. ст., рабочем давлении в коллекторе 80 мм рт. ст. и температуре хладагента (насыщенного раствора  $\text{CaCl}_2$ ) минус 25°C.

При определении влияния температуры газообразного  $\text{UF}_6$  в коллекторе на среднюю производительность ёмкостей и время их заполнения считали, что диаметр входного клапана ёмкостей равен  $65 \cdot 10^{-3}$  м. Температуру газообразного  $\text{UF}_6$  в коллекторе изменяли от 10 до 40°C с шагом 5°C.

Результаты расчётов средней производительности ёмкостей разных объёмов и времени их заполнения от температуры хладагента приведены на рисунках 3.1, 3.2 и в таблице 3.1.

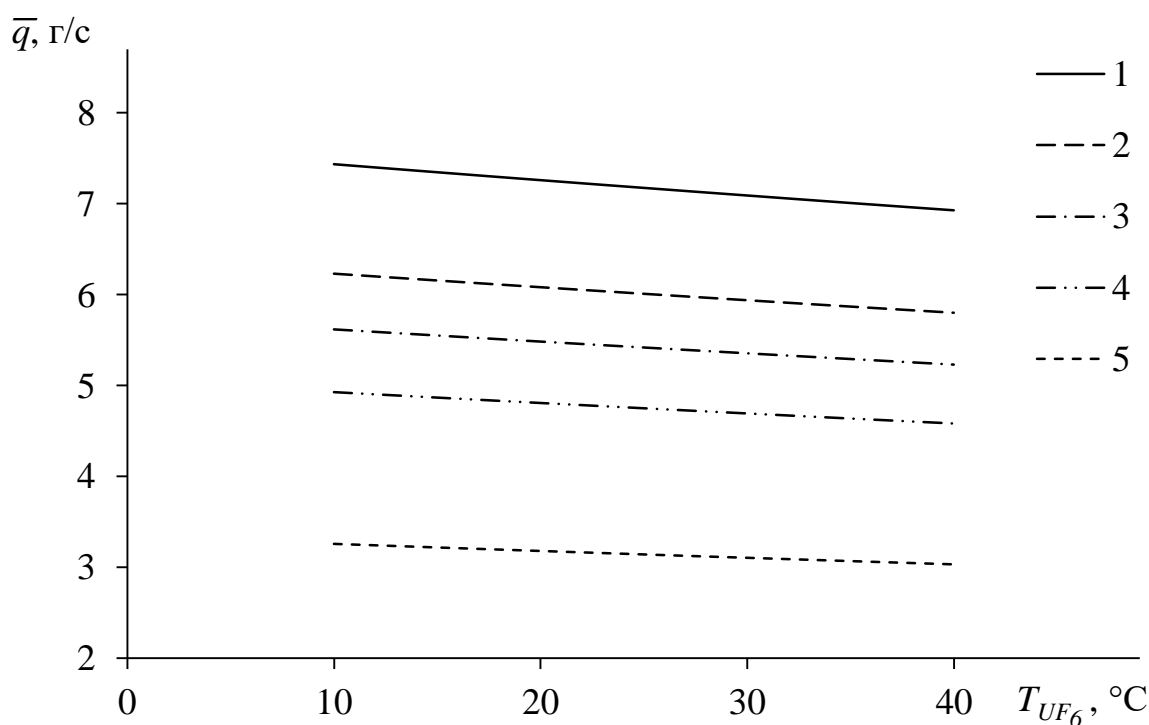


Рисунок 3.1 – Зависимость средней производительности ёмкостей от температуры газообразного  $\text{UF}_6$  в коллекторе:

1 – 4,0 м<sup>3</sup>; 2 – 3,0 м<sup>3</sup>; 3 – 2,5 м<sup>3</sup>; 4 – 2,0 м<sup>3</sup>; 5 – 1,0 м<sup>3</sup>

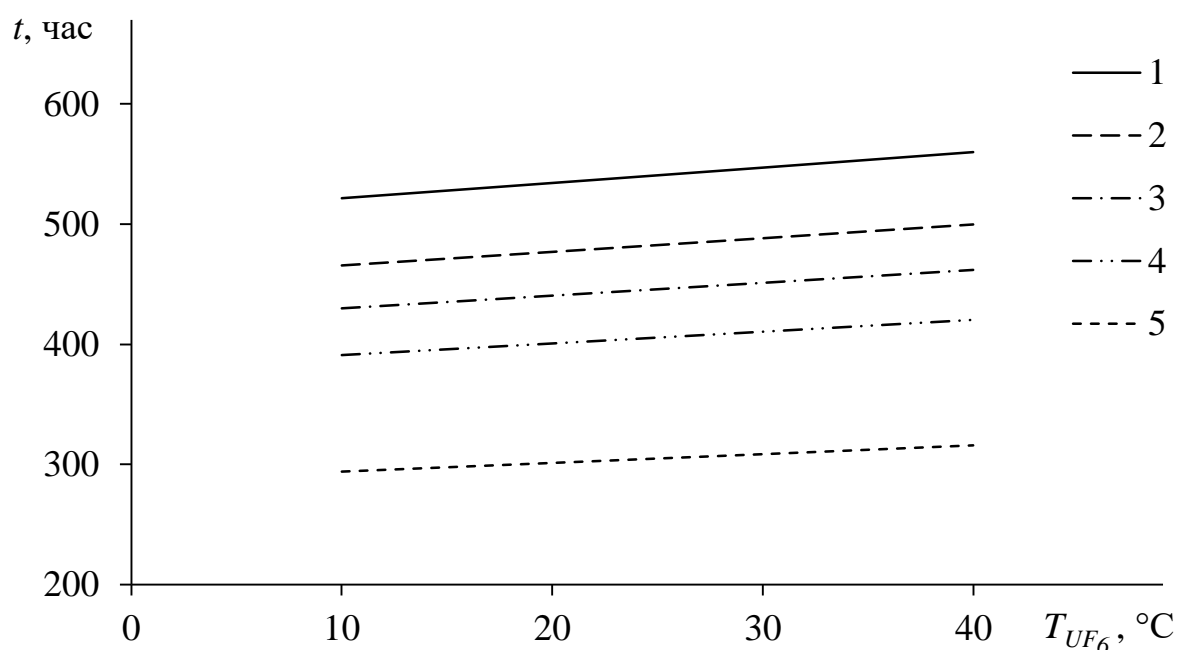


Рисунок 3.2 – Зависимость времени заполнения ёмкостей от температуры газообразного  $UF_6$  в коллекторе:

1 – 4,0 м³; 2 – 3,0 м³; 3 – 2,5 м³; 4 – 2,0 м³; 5 – 1,0 м³

Таблица 3.1 – Изменение средней производительности и времени заполнения ёмкостей десублимированным  $UF_6$  до 70% их свободного объёма при изменении температуры газообразного  $UF_6$  в коллекторе от 10 до 40°C

Объём ёмкости, $V, \text{ м}^3$	Увеличение средней производительности ёмкости, $\Delta \bar{q}, \%$	Уменьшение времени заполнения ёмкости, $\Delta t, \%$
1,0	7,0	7,6
2,0	7,0	7,5
2,5	7,4	6,9
3,0	7,4	6,9
4,0	7,3	6,8

Проведённые расчёты динамики заполнения ёмкостей без оребрения объёмом 1,0...4,0 м³ десублимированным  $UF_6$  (рисунки 3.1 и 3.2, таблица 3.1)

показали, что понижение температуры газообразного  $\text{UF}_6$  в коллекторе с 40 до  $10^\circ\text{C}$  приводит к линейному увеличению средней производительности на 7,0...7,4% и уменьшению времени заполнения ёмкостей на 6,8...7,6%. Это связано с тем, что при повышении температуры газообразного  $\text{UF}_6$  в коллекторе от него требуется отводить большее количество тепла через слой десублимата и стенку ёмкости к хладагенту. Понижение температуры газообразного  $\text{UF}_6$  ниже  $10^\circ\text{C}$  не рассматривалось, так как для него потребуется дополнительное холодильное оборудование, что усложнит технологию и увеличит её себестоимость, а также может привести к закупорке трубопроводов коллектора десублиматом.

Для демонстрации нестационарности процесса приведём в качестве примера зависимость динамики изменения массы десублимированного  $\text{UF}_6$  и средней производительности ёмкости объёмом  $1,0 \text{ м}^3$  (рисунок 3.3).

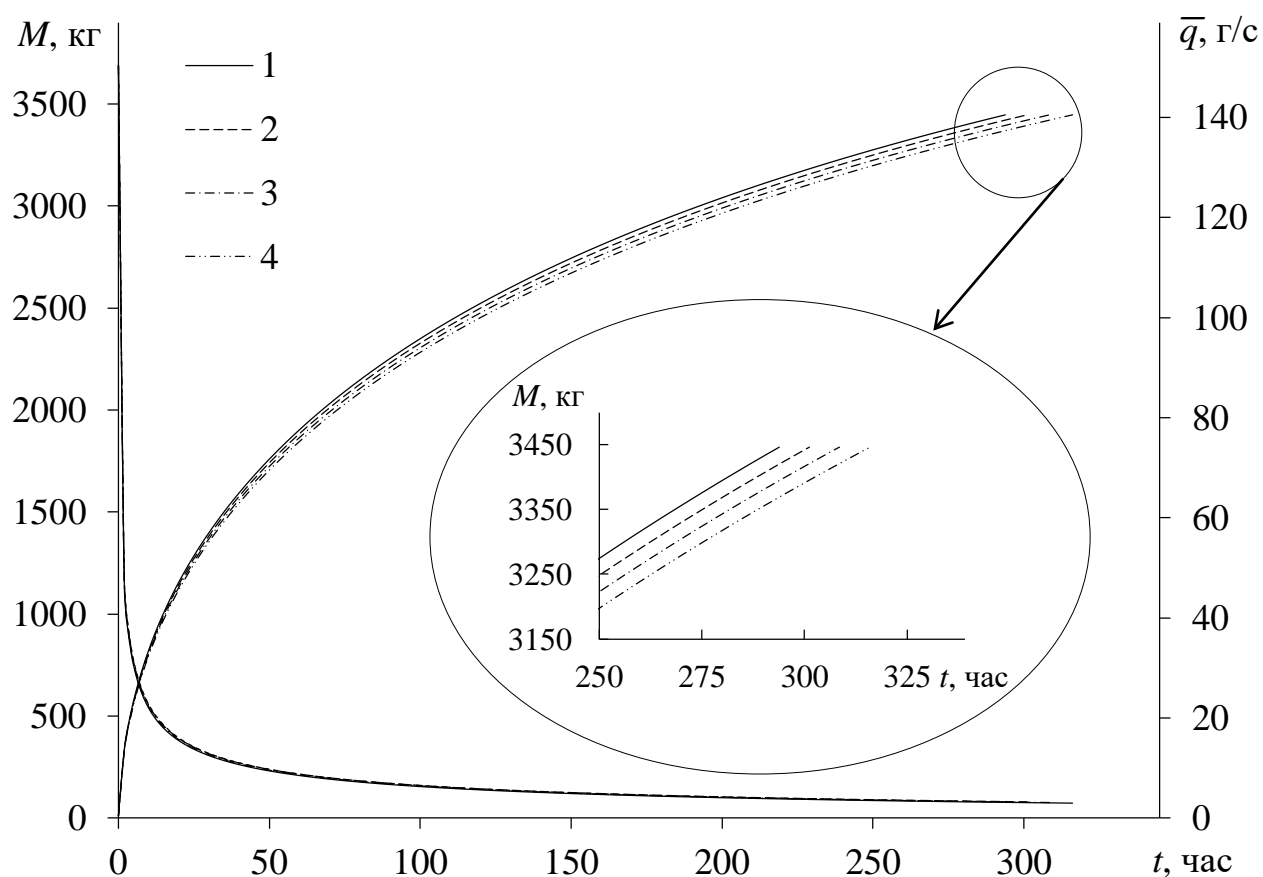


Рисунок 3.3 – Динамика массы десублимированного  $\text{UF}_6$  и средней производительности ёмкости объёмом  $1,0 \text{ м}^3$  при температуре газообразного  $\text{UF}_6$ : 1 –  $10^\circ\text{C}$ , 2 –  $20^\circ\text{C}$ , 3 –  $30^\circ\text{C}$ , 4 –  $40^\circ\text{C}$

Из графиков зависимости динамики массы десублимированного  $\text{UF}_6$  и средней производительности ёмкости от температуры газообразного  $\text{UF}_6$  (рисунок 3.3) видно, что представленные зависимости нелинейны.

Далее была исследована зависимость средней производительности и времени заполнения ёмкостей различного объёма при температуре газообразного  $\text{UF}_6$   $30^\circ\text{C}$  и изменении диаметра входного клапана от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $65 \cdot 10^{-3}$  м с шагом  $5 \cdot 10^{-3}$  м.

Результаты расчёта приведены на рисунках 3.4, 3.5 и в таблицах 3.2, 3.3.

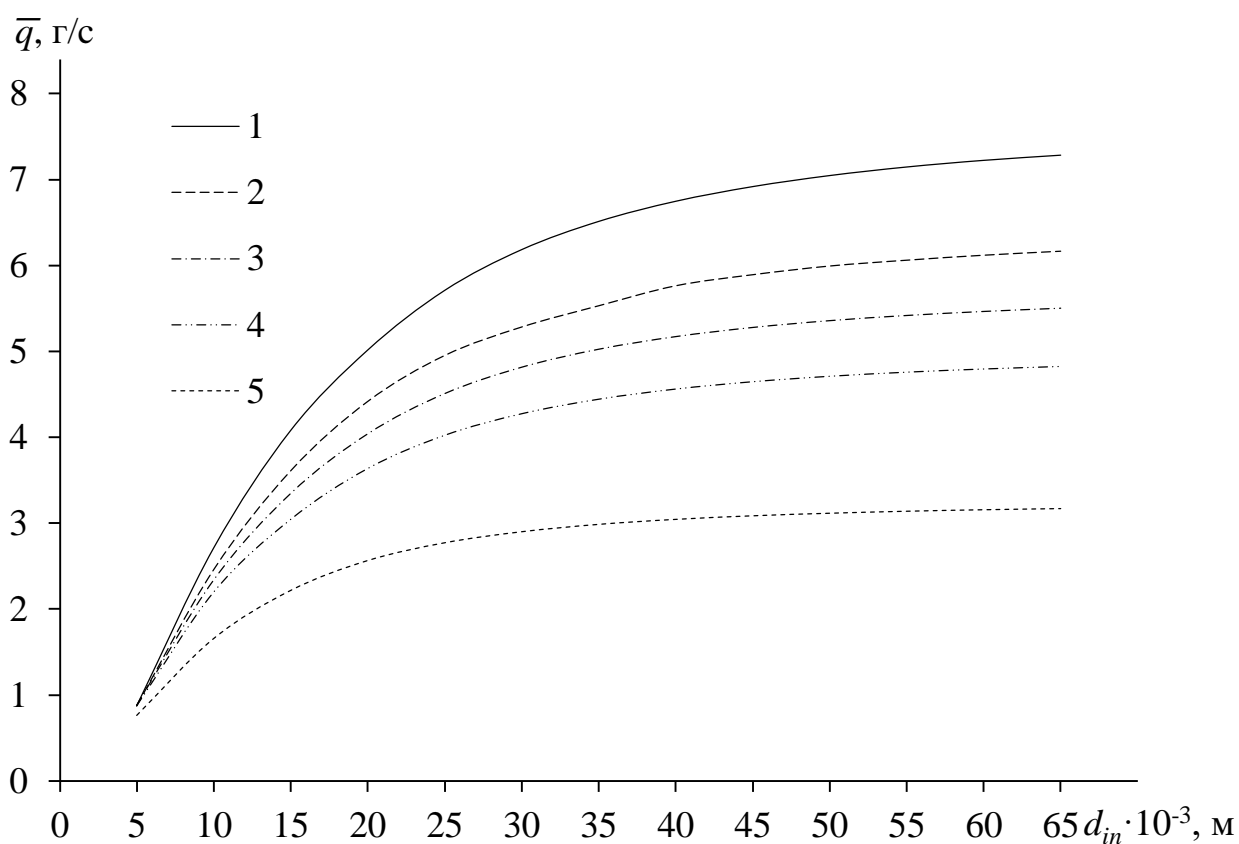


Рисунок 3.4 – Зависимость средней производительности ёмкостей без оребрения различного объёма от диаметра входного клапана:

1 –  $4,0 \text{ м}^3$ , 2 –  $3,0 \text{ м}^3$ , 3 –  $2,5 \text{ м}^3$ , 4 –  $2,0 \text{ м}^3$ , 5 –  $1,0 \text{ м}^3$

На рисунках 3.4 и 3.5 показано, что с увеличением диаметра входного клапана возрастает средняя производительность ёмкостей и уменьшается время их заполнения. С увеличением объёма ёмкостей увеличивается время их заполнения.

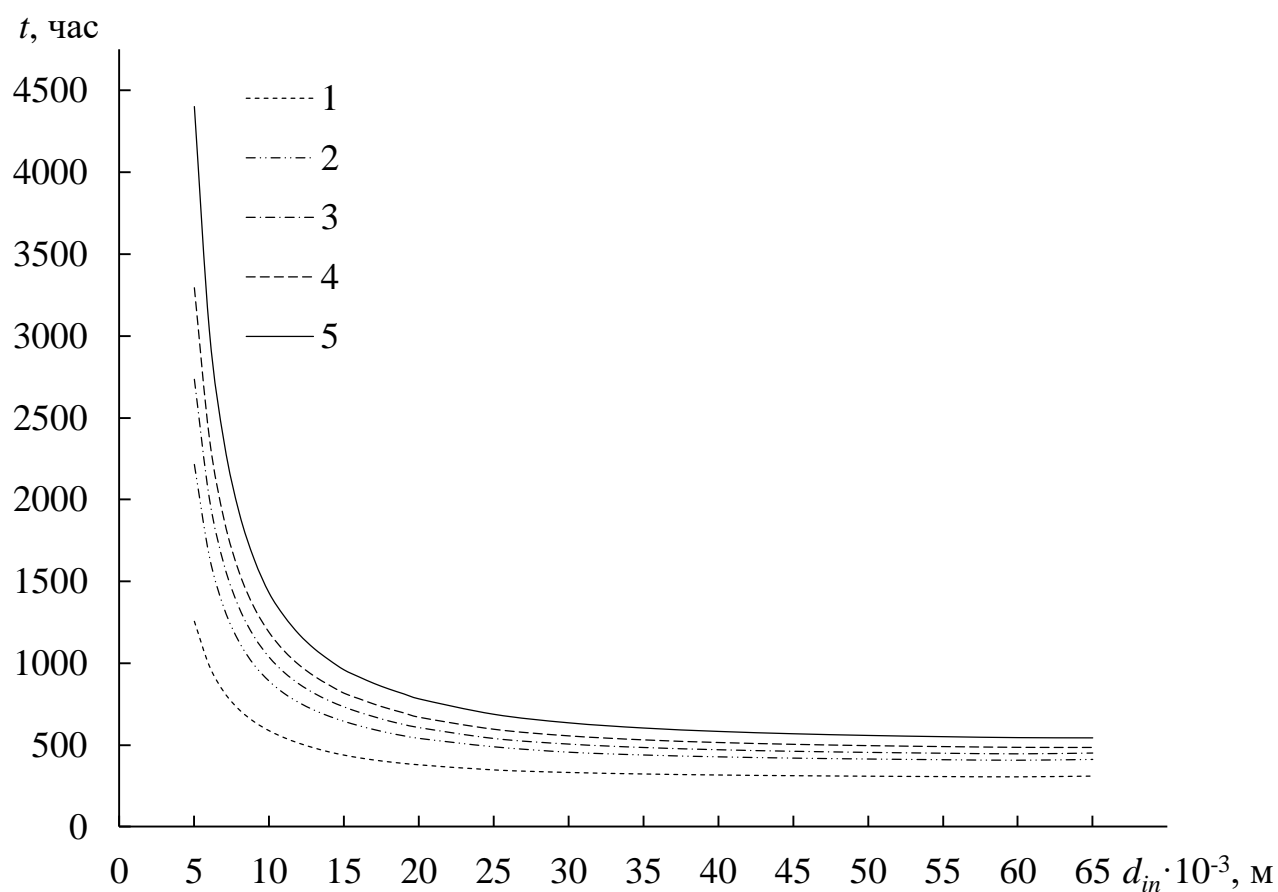


Рисунок 3.5 – Зависимость времени заполнения ёмкостей без оребрения различного объёма от диаметра входного клапана:

1 – 1,0 м³, 2 – 2,0 м³, 3 – 2,5 м³, 4 – 3,0 м³, 5 – 4,0 м³

Таблица 3.2 – Изменение средней производительности  $\bar{q}$  и времени заполнения ёмкостей  $t$  различного объёма без оребрения десублимированным  $\text{UF}_6$  при изменении диаметра входного клапана  $d_{in}$  с  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $65 \cdot 10^{-3}$  м

Объём ёмкости, $V$ , м³	Увеличение средней производительности ёмкости $\Delta \bar{q}$ , %	Уменьшение времени заполнения ёмкости $\Delta t$ , раз
1,0	76,0	4,2
2,0	82,0	5,5
2,5	84,0	6,2
3,0	85,7	7,0
4,0	88,0	8,3

Если принять изменение  $\Delta\bar{q}$  и  $\Delta t$  не более 5%, когда зависимости  $\bar{q}$  и  $t$  от  $d_{in}$  становятся практически линейными (рисунки 3.4, 3.5), то по данным таблицы 3.3 можно определить диаметр входного клапана достаточный для эффективной работы ёмкостей: для ёмкости объёмом 1,0 м<sup>3</sup>  $d_{in}$  будет равен  $25 \cdot 10^{-3}$  м, для ёмкостей объёмом 2,0; 2,5; 3,0 м<sup>3</sup> –  $30 \cdot 10^{-3}$  м, для ёмкости объёмом 4,0 м<sup>3</sup> –  $35 \cdot 10^{-3}$  м.

Таблица 3.3 – Изменение средней производительности  $\Delta\bar{q}$  и времени заполнения ёмкостей  $\Delta t$  различного объёма без оребрения десублимированным UF<sub>6</sub> при изменении диаметра входного клапана  $d_{in}$  на один шаг ( $5 \cdot 10^{-3}$  м)

$\Delta d_{in}$ $\cdot 10^{-3}, \text{м}$	$V, \text{м}^3$									
	1,0		2,0		2,5		3,0		4,0	
	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$
5-10	54,0	117,4	60,3	151,7	62,3	165,3	64,3	180,2	67,7	209,4
10-15	25,3	33,8	27,8	38,5	30,1	43,1	31,8	46,7	33,5	50,4
15-20	13,6	15,7	16,3	19,5	17,2	20,7	18,3	22,3	18,6	22,9
20-25	7,5	8,1	9,6	10,6	10,4	11,6	10,8	12,1	12,2	13,8
25-30	4,4	4,6	5,9	6,2	6,4	6,8	6,3	6,7	7,7	8,3
30-35	2,9	3,0	3,8	3,9	4,2	4,4	4,5	4,7	5,0	5,3
35-40	1,9	2,0	2,6	2,7	2,8	2,9	4,0	4,2	3,5	3,6
40-45	1,4	1,4	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,5	2,5
45-50	1,0	1,0	1,4	1,4	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,9
50-55	0,7	0,7	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,4	1,4
55-60	0,6	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1
60-65	0,4	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8



На рисунке 3.6 приведена динамика массы десублимированного  $\text{UF}_6$  в ёмкости объёмом  $1,0 \text{ м}^3$  при различных значениях диаметра входного клапана.

Из зависимостей на рисунке 3.6 видно, что при малых диаметрах входного клапана начальные участки кривых линейны и, чем меньше диаметр, тем больше длительность линейного участка кривой. Это можно объяснить тем, что малые диаметры входного клапана ёмкости ограничивают расход поступающего в неё газообразного  $\text{UF}_6$  и, соответственно, его подвод к теплообменной поверхности (стенкам ёмкости, слою образовавшегося десублимата). Увеличение толщины слоя десублимата и повышение его термического сопротивления приводит к снижению скорости десублимации.

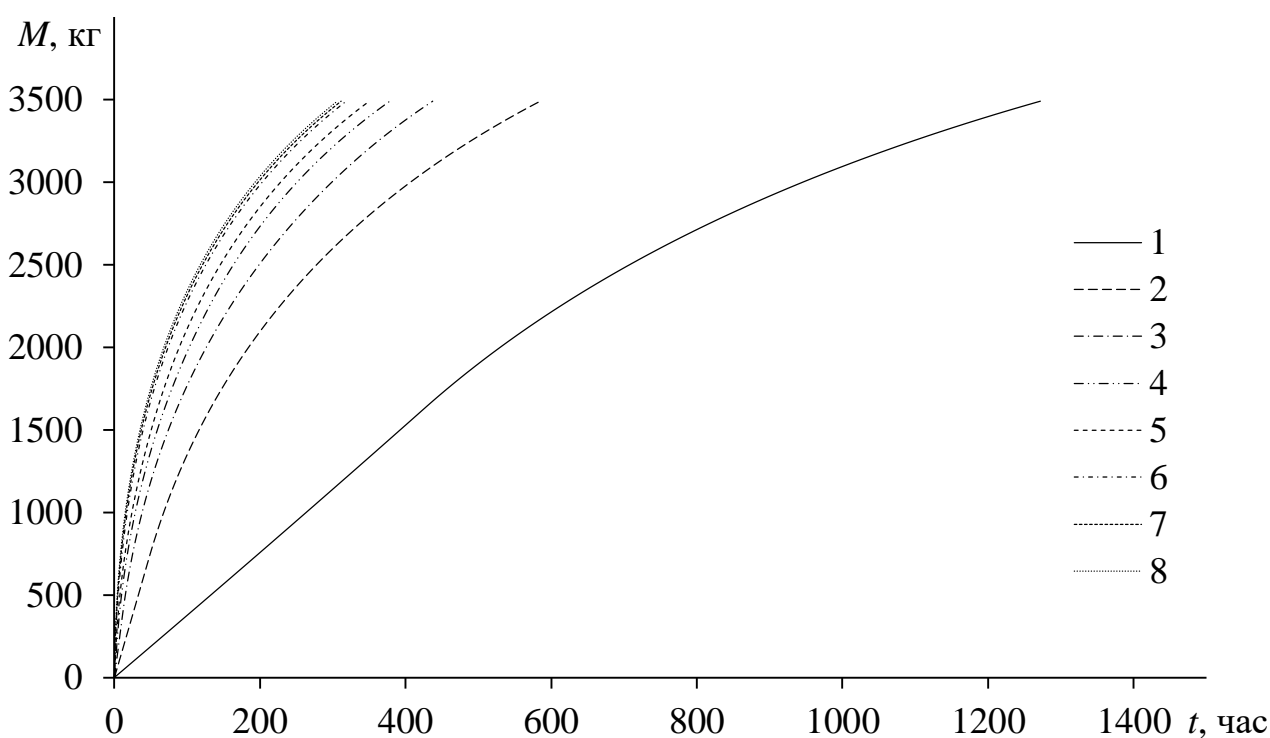


Рисунок 3.6 – Динамика массы десублимированного  $\text{UF}_6$  в ёмкости объёмом  $1,0 \text{ м}^3$  от времени её заполнения:

1 –  $d_{in}=5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , 2 –  $d_{in}=10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , 3 –  $d_{in}=15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , 4 –  $d_{in}=20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,

5 –  $d_{in}=25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , 6 –  $d_{in}=40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , 7 –  $d_{in}=50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , 8 –  $d_{in}=65 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

После того, как средняя производительность ёмкости становится меньше расхода газообразного  $\text{UF}_6$ , поступающего через входной клапан (рисунок 3.6), зависимость становится нелинейной. При увеличении диаметра

входного клапана ход кривых становится все более нелинейным, что согласуется с теорией протекания нестационарных процессов. Для ёмкостей большего объёма влияние диаметра клапана на процесс десублимации усиливается. Чем больше объем ёмкости и меньше диаметр входного клапана, тем больше длительность линейного участка кривой  $M(t)$ .

#### **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта и формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательской работе;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной эффективности исследования [53].

Данная выпускная квалификационная работа направлена на исследование и оптимизацию процесса десублимации  $UF_6$  в вертикальных погружных ёмкостях без оребрения различного объёма.

##### **4.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, области производства, основная цель которых, это использование ёмкостей с высокими физико-химическими показателями, например, хранилища уранового топлива.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования методики повышения производительности ёмкостей за счёт

изменения параметров, рассмотренных в ВКР. Результаты сегментирования представлены на рисунке 4.1.

		Расчётная модель динамики десублимации гексафторида урана с учётом геометрии ёмкости и параметров её заполнения			
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Иные производственные отрасли	Экспортный контроль
Потребность	Сильная				
	Средняя				

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения

#### 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Главное преимущество – это расчёт параметров технологического режима и геометрических параметров, при которых будет получена ёмкость с нужными, для определённых целей, характеристиками. Численное моделирование позволяет провести исследования повышения эффективности заполнения ёмкостей и её количественной оценки. Расчётная модель позволяет также избавиться от многочисленных экспериментов и крупных финансовых затрат на их реализацию. Исходя из этого конкурентами являются:

- экспериментальные исследования динамики десублимации гексафторида урана в зависимости от геометрии ёмкости и параметров технологического режима;

- теоретический расчёт параметров десублимации гексафторида урана в зависимости от геометрии ёмкости и технологического режима.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путём по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее

сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путём, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле [53]:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство эксплуатации	0,15	4	3	2	0,6	0,45	0,3
3. Экономичность	0,03	5	2	3	0,15	0,06	0,09
4. Надёжность	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
5. Закрытость получаемых данных	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
6. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	4	0,25	0,05	0,2
7. Стабильность	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
8. Доступность	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Затраты на разработку	0,12	5	1	3	0,6	0,12	0,36
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
4. Финансирование разработанного метода	0,1	4	1	3	0,4	0,1	0,3
Итого	1				4,5	2,62	2,95

#### 4.1.2 SWOT-анализ

Для комплексной оценки научно-исследовательского проекта применяют SWOT-анализ, результатом которого является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для его реализации.

В таблице 4.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица проекта

Возможности работы	Сильные стороны работы				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	+	+	+
B3	+	+	+	+	+
B4	+	+	+	+	+
B5	+	+	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определённый результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – SWOT-анализ

Сильные стороны проекта: С1. Актуальность выбранной темы. С2. Применение современного оборудования и программного кода. С3. Бюджетное финансирование. С4. Получение результатов высокой точности. С5. Возможность оптимизации и расчётной модели.	Слабые стороны проекта: Сл1. Ограниченное применение конкретной модели. Сл2. Требуется экспериментальное подтверждение результатов. Сл3. Закрытость программного кода. Сл4. Отсутствие контроля и анализа результатов потребителя Сл5. Ограниченные возможности расчёта (только для определённых компонентов).
--	---

<p>Возможности:</p> <p>В1. Вывод продукта на международный уровень.</p> <p>В2. Разработка пакета обновлений продукта.</p> <p>В3. Сотрудничество с различными предприятиями отрасли для расширения возможностей модели.</p> <p>В4. Возможность исследования различных ёмкостей.</p> <p>В5. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Полное обеспечение условий для создания и применения модели для расчётов.</p> <p>2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики и использованием современных расчётных моделей.</p> <p>3. Высокая точность получаемых результатов позволяет повысить спрос на расчётную модель</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Необходимо экспериментальное подтверждение, что возможно реализовать в условиях вуза.</p> <p>2. Закрытость расчётной модели не отражается на точности результатов.</p> <p>3. Круг потребителей можно увеличить с помощью увеличения возможностей расчётной модели.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Низкий спрос со стороны предприятий.</p> <p>У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями.</p> <p>У3. Сложность в продвижении модели.</p> <p>У4. Полное отсутствие спроса.</p> <p>У5. Разработка новейших моделей расчёта.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>1. Благодаря возможностям расчётной модели и своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.</p> <p>2. Так как существует возможность оптимизации расчётной модели, то это позволит конкурировать с новейшими разработками.</p> <p>3. Дополнительное финансирование позволит продвинуть расчётную модель на рынок.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>1. Создание подобных моделей другими организациями можно решить с помощью возможностей расчётной модели, которых нет у конкурентов.</p> <p>2. Несовершенства разработанной модели можно решить с помощью оптимизации модели под требуемые параметры</p>

#### 4.2 Планирование научно-исследовательской работы

В настоящее время наука в значительной степени определяет темпы

технического прогресса и роста народного благосостояния. Только рациональное использование выделяемых для науки средств, концентрация их на приоритетных направлениях, совершенствование координации деятельности научно-исследовательских учреждений, быстрое внедрение научных и исследовательских разработок и проектов может ускорит научно-технический прогресс. Это обуславливает необходимость планирования и организации научно-исследовательских работ.

Таблица 4.4 – Календарный план выполнения НИР

№	Название работы	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Исполнители
1	Разработка технического задания	3	3.02.2020	5.02.2020	Руководитель
2	Выбор направления исследования	4	6.02.2020	9.02.2020	Руководитель, Инженер
3	Составление и утверждение технического задания	7	10.02.2020	16.02.2020	Руководитель
4	Утверждение темы ВКР	7	17.02.2020	23.02.2020	Руководитель
5	Подбор и изучение материалов по теме	15	24.02.2020	9.03.2020	Инженер
6	Календарное планирование работ	4	10.03.2020	13.03.2020	Инженер
7	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	36	14.03.2020	18.04.2020	Руководитель, Инженер
8	Обобщение и оценка результатов	8	19.04.2020	26.04.2020	Руководитель, Инженер
9	Составление пояснительной записки	36	27.04.2020	31.05.2020	Инженер

В рамках планирования исследовательской работы построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта (таблица 4.5).

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором



работы по теме представляются протяжёнными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научной работы. При этом работы на графике следует выделить различным обозначением в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу [54].

### **4.3 Бюджет научного исследования**

Целью планирования себестоимости проведения НИР является экономически обоснованное определение величины затрат на её выполнение. В плановую себестоимость НИР включаются все затраты, связанные с её выполнением независимо от источника финансирования.

В процессе формирования бюджетной стоимости НИР используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научно-исследовательских работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### **4.3.1 Материальные затраты на исследование**

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Материальными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.5 – Календарный план–график проведения ВКР

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>кi</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Февраль			Март			Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Разработка технического задания	Руководитель	3												
2	Выбор направления исследования	Руководитель, Инженер	8												
3	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	7												
4	Утверждение темы ВКР	Руководитель	7												
5	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	15												
6	Календарное планирование работ	Инженер	4												
7	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	Руководитель, Инженер	42												
8	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, Инженер	10												
9	Составление пояснительной записки	Инженер	36												

Научный руководитель -



Инженер -



Таблица 4.6 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
1. Ручка	55	6	330
2. Тетрадь для записей	25	2	50
3. Печать на листах А4	2	500	1000
Итого			1380

#### 4.3.2 Расчёт амортизации специального оборудования

Расчёт сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее. При выполнении научно-исследовательской работы использовался ПЭВМ – Asus. Срок полезного использования данного компьютера по паспорту составляет 3 года (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	ПЭВМ	2	3	45000	90000
Итого		90000 руб.			

Расчёт амортизации проводился следующим образом:

$$H_A = 1/n, \quad (4.2)$$

где  $n$  - срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot t, \quad (4.3)$$

где  $I$  - итоговая сумма, тыс. руб.;  $t$  - время использования, мес.

Таким образом, общая сумма амортизационных отчислений ПЭВМ:

$$A = \frac{0,33 \cdot 90000}{12} \cdot 3 = 7500 \text{ руб.}$$

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей

Раздел включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату [53].

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (4.4)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата;

$З_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $З_{осн}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (4.5)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

$З_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = (З_{м} \cdot M) / F_{д},$$

где  $З_{м}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{д}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 4.8.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{м} = З_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_{д}) \cdot k_{р}, \quad (4.6)$$

где  $З_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{д}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет 0,15-0,2 для НИИ [53];

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	48	24
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	240	220

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад - определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Заработная плата по тарифной ставке  $Z_{тс}$  определяется исходя из размеров окладов, определённых штатным расписанием предприятия;

2) стимулирующие выплаты - устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.;

3) иные выплаты, районный коэффициент.

Результаты расчёта основной заработной платы представлен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , руб	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_{раб}$ раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	33665	0.3	0.15	1.3	63459	2629	29	79746
Инженер	14988	0.3	0.15	1.3	28252	1438	103	148145

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (4.7)$$

где  $З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты ( $k_{\text{доп}}=0,14$ );

$З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.10 приведён расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.10 – Заработная плата исполнителей ВКР

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб	79746	148145
Дополнительная зарплата, руб	11164	–
Зарплата исполнителя, руб	90911	148145
Итого по статье $C_{\text{зн}}$ , руб	239056	

#### 4.3.5 Отчисления в государственные страховые фонды

Отчисления во внебюджетные фонды являются обязательными по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования от затрат на оплату труда работников.

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ для образовательных учреждений на 2020 г. (ст. 425, 426 НК РФ) размер страховых взносов водится по ставке 30 %.

Выплаты в страховые фонды определяются по формуле:

$$З_{\text{стр}} = К_{\text{стр}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (4.8)$$

где  $К_{\text{стр}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.)

Таблица 4.11 – Отчисления во внебюджетные фонды

	Исполнитель	
	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	79746	148145
Дополнительная заработная плата, руб.	11164	–
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды, %	0,3	
Итого	27273	44444
В сумме	71717	

#### 4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = К_{\text{пр}} \cdot (З_{\text{м}} + З_{\text{зп}} + З_{\text{стр}}), \quad (4.9)$$

где  $К_{\text{пр}}$  – коэффициент прочих расходов (равный 0,16).

#### 4.3.7 Формирование бюджета затрат на научно-исследовательскую работу

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на дипломную работу по каждому

варианту исполнения приведён в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Калькуляции плановой себестоимости

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Текущая работа	Руководитель (исп.1)	Инженер (исп.2)	
1. Материальные затраты ВКР	1380	280	1100	Пункт 4.3.1
2. Затраты на специальное оборудование для научно-исследовательских работ	7500	3750	3750	Пункт 4.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	227891	79746	148145	Пункт 4.3.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	11164	11164	–	Пункт 4.3.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	71717	27273	44444	Пункт 4.3.5
6. Накладные расходы	51144	19554	31590	16 % от суммы статей 1-5
7. Бюджет затрат ВКР	370797	141768	229029	Сумма статей 1-6

#### 4.4 Определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчёта интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле [53]:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (4.10)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{текущ. работа}} = \frac{370797}{370797} = 1,$$



$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{141768}{370797} = 0,38,$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{229029}{370797} = 0,62.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.11)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путём по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Результаты расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения работы

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущая работа	Руководитель (исп.1)	Инженер (исп.2)
1. Точность вычислений	0,26	5	5	4
2. Скорость производства расчётов	0,25	5	4	5
3. Удобство в эксплуатации	0,25	5	5	5
4. Визуализация результатов	0,24	5	4	5
Итого	1	5	4,5	4,8

$$I_{\text{р-текущ.работа}} = 5 \cdot 0,26 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,24 = 5,0,$$

$$I_{\text{р-исп1}} = 5 \cdot 0,26 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,24 = 4,5,$$

$$I_{\text{р-исп2}} = 4 \cdot 0,26 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,24 = 4,8.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{\text{р-исп}i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}}, \quad (4.12)$$

$$I_{\text{текущ.работа}} = \frac{5,0}{1} = 5,0,$$

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{4,5}{0,38} = 11,9,$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{4,8}{0,62} = 7,7.$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{текущ.работа}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}}, \quad (4.13)$$

Таблица 4.14 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатель	Текущая работа	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,38	0,62
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5,0	4,5	4,8
3	Интегральный показатель эффективности	5,0	11,9	7,7
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,4	0,7

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» была построена карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения, анализ которой показал, что результаты данной научно-исследовательской работы могут быть востребованы в атомной промышленности, научной отрасли и других производственных отраслях.

На основании анализа конкурентных технических решений сделан вывод, что применяемая в данной ВКР методика определения необходимых параметров процесса десублимации  $UF_6$  является наиболее оптимальной для использования в практических целях.

В результате выполнения SWOT-анализа выявлены сильные и слабые стороны, возможности и угрозы научно-исследовательской работы. Результаты анализа приведены в таблице 4.3.

Также проведено планирование научно-исследовательской работы, в ходе которого были определены: материальные затраты, затраты на специальное оборудование, заработная плата исполнителей темы, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы. Общая сумма затрат на выполнение НИР инженером с учётом затрат на специальное оборудование составила 370797 руб., время, необходимое для его выполнения 103 календарных дня.

Произведена сравнительная характеристика эффективности разработки на основании интегрального показателя эффективности. Полученные данные приведены в таблице 4.14. Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация НИР исполнителями в команде является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## **5. Социальная ответственность**

Работа проведена с помощью разработанной ранее [1-3] двухмерной математической модели нестационарного процесса десублимации  $UF_6$  на ПЭВМ. Целью работы являлось проведение численного моделирования процесса десублимации  $UF_6$  в вертикальные ёмкости без оребрения объёмом  $1,0 \dots 4,0 \text{ м}^3$ , исследование влияния температуры газообразного  $UF_6$  и диаметра входного клапана для определения возможности повышения производительности данных ёмкостей и её количественной оценки. Работа выполнена в аудитории, расположенной на 2 этаже 10 корпуса, Отделения ядерно-топливного цикла ТПУ.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства**

Нормативное регулирование охраны труда при осуществлении трудовой деятельности на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ, осуществляется посредством следующих документов:

- Трудовой кодекс Российской Федерации [55];
- ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [56];
- ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере [57];
- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [58];
- ГОСТ 12.1.003-74 "ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация" [59];
- ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и

номенклатура видов защиты [60];

– ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [61];

– ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность [62].

Приведённые нормативные документы регламентируют: нормы рабочего времени; перерывы между работой; требования к атмосферным показателям в рабочих помещениях; требования к освещённости рабочего места, уровня шума, конструкции рабочей мебели, расположению ПЭВМ; требования безопасности при выполнении работ; требования безопасности в аварийных ситуациях и др.

При выполнении работ за ПЭВМ необходимо следовать требованиям СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Согласно [58], для обучающихся старших курсов допускается длительность работы за компьютером до 3 академических часов с суммарным временем непосредственной работы не более 50% от общего времени учебных занятий при соблюдении профилактических мероприятий в виде перерывов.

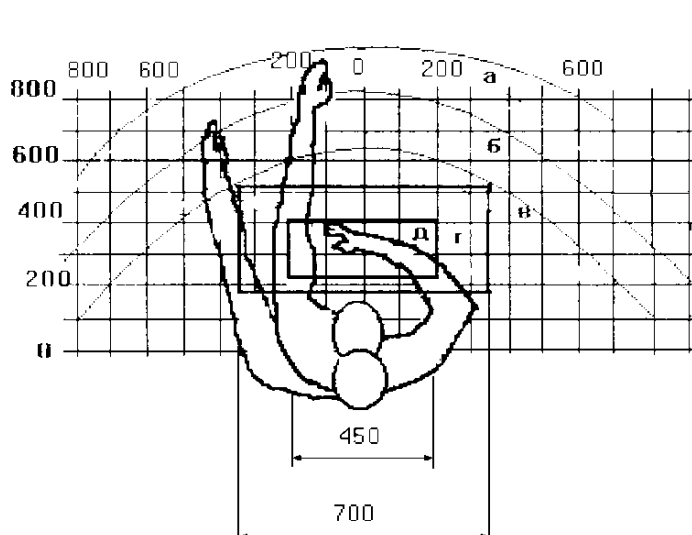
### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.**

При размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м [58].

Рациональная планировка рабочего места предусматривает чёткий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне лёгкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 4.2.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура - в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа).



- а - зона максимальной досягаемости рук,
- б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке,
- в - зона легкой досягаемости ладони,
- г - оптимальное пространство для грубой ручной работы,
- д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Рисунок 4.2 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

При организации рабочего места также необходимо соблюдать следующие требования [58]: учитывать рост пользователя, характер и продолжительность работы в ПЭВМ; конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе с ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления; рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также по расстоянию спинки от переднего края сиденья. Письменный стол также должен быть выполнен в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03:

- высота рабочей поверхности стола в пределах 680-800 мм;
- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;

– должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

## **5.2 Производственная безопасность**

### **5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования**

Объект исследования представляет собой технологию десублимации гексафторида урана в вертикальные погружные ёмкости без оребрения. Работа направлена на исследование влияния температуры газообразного  $UF_6$  и диаметра входного клапана для определения возможности повышения производительности заполняемых ёмкостей и её количественной оценки.

При работе с ураном и его соединениями, а также при работе на оборудовании, загрязнённом ураном, на персонал оказывают воздействие вредные и опасные физические производственные факторы, связанные с его радиоактивностью: повышенный уровень ионизирующего излучения.

Ионизирующее излучение при воздействии на организм человека может вызывать два вида эффектов: детерминированные пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой ожог и др.) и стохастические беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы и др.). Степень воздействия излучения зависит от того, является облучение внешним или внутренним. Радиоактивные и химически токсичные вещества могут попадать внутрь организма тремя путями: ингаляционным (через органы дыхания), перкутанным (через кожу) и пероральным (через рот, желудочно-кишечный тракт).

Также следует выделить следующие вредные химические производственные факторы:

- токсичные химические вещества (уран и его соединения);
- раздражающие химические вещества (воздействие плавиковой

кислоты и её паров).

Известно, что химическая токсичность урана и его соединений представляет большую опасность для здоровья персонала, чем его радиоактивность.

Характеристика опасных и токсичных продуктов присутствующих при проведении процесса десублимации гексафторида урана представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Опасные и токсичные продукты

Продукт	Класс опасности	ПДК в воздухе рабочей зоны (максимальная разовая), мг/м <sup>3</sup>	Действие на организм
Гексафторид урана (UF <sub>6</sub> )	1	0,015	Чрезвычайно едкое вещество, разъедающее любую живую органику с образованием химических ожогов. Воздействие паров и аэрозолей вызывает отёк лёгких, вызывает тяжёлые отравления, обладает кумулятивным эффектом с поражением печени и почек.
Фтористо-водородная (плавиковая) кислота (HF)	2	0,5	Обладает выраженным эффектом при вдыхании, раздражающим действием на кожу и слизистые оболочки глаз; кожно-резорбтивным, эмбриотропным, мутагенным и кумулятивным действием. При попадании на кожу легко и незаметно всасывается, через короткое время вызывает отёк, боль, химический ожог и общетоксическое действие.

В зависимости от количественной характеристики и продолжительности действия отдельные вредные производственные факторы могут стать опасными.

### **5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

В таблице 5.2 приведён перечень вредных и опасных факторов, оказывающих воздействие на персонал, при выполнении работ [59].



Таблица 5.2 – Вредные и опасные факторы при работе с ПЭВМ

Фактор	Вид фактора		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Отклонение показателей микроклимата	+		СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [63].
2. Недостаточная освещённость рабочей зоны	+		СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение [64]; СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение [65].
3. Шум	+		СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [66].
4. Электромагнитное излучение	+		СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.
5. Нервно-психические перегрузки	+		Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда [67].
6. Поражение электрическим током		+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

Приведённые в таблице 5.2 факторы могут оказывать влияние на состояние здоровья, привести к травмоопасной ситуации.

Значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха).

Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию или перегрев.

В соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и 2.2.4.548-96, оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Оптимальные величины температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения, не более м/с
Холодный	Ia	22÷24	40÷60	0,1
Тёплый	Ia	23÷25	40÷60	0,1

Основным документом, определяющим условия труда при работе с ПЭВМ, является СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». В правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в условиях недостаточной освещённости и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

Согласно [58] освещённость на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещённость поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Шум – это беспорядочное сочетание звуков различной частоты и интенсивности. Шум оказывает комплексный негативный эффект на весь организм человека: вызывает утомление, головные боли, нарушает работу сердечно-сосудистой системы, а также может стать причиной развития тугоухости. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, а также осветительными приборами дневного света. Согласно [68] ПДУ шума для производственных

помещений величиной 80 дБ.

Основными источниками электромагнитного излучения в данной работе являются системный блок ПЭВМ и экран видеомонитора. Воздействие электромагнитного поля может стать причиной учащённого пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции. В соответствии с [58] напряжённость электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц: 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц: 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц: 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц: 25 нТл

При длительной и монотонной работе за ПЭВМ работники неизбежно сталкиваются с нервно-психическими перегрузками, связанными с напряжённостью трудового процесса, возникающими от умственного перенапряжения, в том числе вызванного информационной нагрузкой; монотонностью труда, эмоциональным перенапряжением. Для минимизации действия данного фактора необходимо соблюдать режим труда и отдыха [69].

Сила поражения электрическим током и тяжесть его воздействия зависит от таких факторов, как: мощность разряда, время воздействия, характер тока, а также состояние здоровья человека, его возраста, влажности тела, а также от места соприкосновения и пути прохождения тока по организму.

Источниками электрической опасности при работе на ПЭВМ могут являться: оголённые части проводов или отсутствие изоляции; замыкания; статическое напряжение.

В результате поражения электрическим током возможно местное поражение тканей и органов электрическим током: ожоги, поражение глаз воздействием на них электрической дуги (электроофтальмия), механические

повреждения (разрыв тканей).

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает ПДУ напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека. Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения электрическим током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути «рука – рука» или «рука – нога» [61].

Значения напряжения прикосновения и силы тока, протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки, не должны превышать значений, приведённых в табл. 5.4.

Таблица 5.4 – Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род тока и его частота	Наибольшие допустимые значения	
	$U_{пр}$ , В	$I_h$ , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

### 5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов

Организационные мероприятия. В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ [58] они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ с видеодисплейными терминалами (ВДТ) на базе электронно-лучевой трубки должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup> и с ВДТ на базе плоских дискретных экранов (жидкокристаллических, плазменных) 4,5 м<sup>2</sup>.

Для обеспечения установленных норм СанПиН 2.2.4.548-96 микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция

используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажности воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли [70].

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Также как средство защиты для минимизации воздействия фактора следует установка местного освещения из-за недостаточной освещённости, оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей и др.

Если помещение не соответствует нормам СНиП 23-05-95 и СП 52.13330.2016, то это влечёт за собой ухудшение здоровья рабочих и как следствие ухудшение рабочего процесса.

В исследовательских аудиториях имеют место шумы различного рода, которые генерируются как внутренними, так и внешними источниками шумов. В рассматриваемом случае внутренними источниками шумов являются рабочее оборудование: персональный компьютер и компьютерная техника другого персонала, находящихся в аудитории. При возможном превышении ПДУ шума [66] мероприятия по защите от шума должны предусматривать звукопоглощающие конструкции (звукопоглощающие облицовки, штучные поглотители), акустические экраны, глушители шума в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Для уменьшения шума, проникающего снаружи помещения, следует установить уплотнения по периметру притворов дверей и окон [71].

При превышении ПДУ ЭМИ [58] возможны следующие меры защиты:

увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной, установка отражающих или поглощающих экранов, конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней ЭМИ, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования.

На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [60]. Действие стресс-раздражителя при выполнении зрительно-напряжённых работ обусловлено чрезмерным или длительным (по времени смены) воздействием факторов трудового процесса, а именно, непосредственным наблюдением за экраном ВДТ. Для снятия зрительного перенапряжения необходимо проведение профилактических мероприятий в режиме рабочего дня: комплекс упражнений зрительной гимнастики, комплекс упражнений для укрепления глазодвигательных мышц и тренировки аккомодации [72].

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути прохождения тока через тело человека, продолжительности воздействия на организм человека, условий внешней среды.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения [73];
- использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются

периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год.

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

При работе с ядерно-делящимся материалом и изделиями из него, при хранении и транспортировке необходимо обеспечить все условия и требования ядерной безопасности [74, 75].

К основным техническим мероприятиям по обеспечению ядерной безопасности при работе с ураном и его соединениями относятся: применение коллективных средств защиты; механизация и автоматизация технологических процессов; рациональное устройство рабочих мест с выполнением требований и норм по расстановке оборудования, обеспечение здоровых и безопасных условий труда.

Персонал, работающий с источниками излучения или посещающие участки, где производятся такие работы, должен быть обеспечен спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты и другими средствами индивидуальной защиты в соответствии с видом и классом работ, соответствующими требованиям ОСПОРБ-99 и государственных стандартов, сертифицированными в установленном порядке.

При работах с радиоактивными веществами в открытом виде I и II класса персонал должен иметь комплект основных средств индивидуальной защиты, а также дополнительные средства защиты в зависимости от уровня и характера возможного радиоактивного загрязнения.

Основной комплект средств индивидуальной защиты включает: спецбелье, носки, комбинезон или костюм (куртка, брюки), спецобувь,

шапочку или шлем, перчатки, полотенца и носовые платки одноразовые, средства защиты органов дыхания (в зависимости от загрязнения воздуха).

При работах III класса персонал должен быть обеспечен халатами, шапочками, перчатками, спецобувью и, при необходимости, средствами защиты органов дыхания (фильтрующими или изолирующими).

Радиационный контроль является частью производственного контроля и должен охватывать все основные виды воздействия ионизирующего излучения на человека.

Целью радиационного контроля является получение информации об индивидуальных и коллективных дозах облучения персонала, пациентов и населения, а также показателях, характеризующих радиационную обстановку.

Радиационный контроль организаций предусматривает проведение контроля и учёта индивидуальных доз облучения персонала. Контроль и учёт доз облучения персонала должен проводиться с учётом требований Единой государственной системы контроля и учёта индивидуальных доз облучения населения (ЕСКИД). Радиационный контроль должен включать индивидуальный дозиметрический контроль персонала и контроль радиационной обстановки.

Индивидуальный дозиметрический контроль проводится с целью определения годовых доз персонала и является обязательным для персонала группы А. Результаты индивидуального контроля доз облучения персонала должны храниться в течение 50 лет. При проведении индивидуального контроля необходимо вести учёт годовых эффективной и эквивалентных доз, эффективной дозы за 5 последовательных лет, а также суммарной накопленной дозы за весь период профессиональной работы. Результаты радиационного контроля сопоставляются со значениями пределов доз и контрольными уровнями. Превышения контрольных уровней должны анализироваться администрацией объекта. О случаях превышения годовых пределов эффективных доз для персонала, установленных НРБ-99/2009, годовых пределов эквивалентных доз облучения персонала или квот



облучения населения, администрация должна информировать органы исполнительной власти, уполномоченными осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор.

### **5.3 Экологическая безопасность**

Экологическая безопасность является обязательным условием развития ядерных технологий и эксплуатации объектов ядерной энергетики. Она складывается из двух составляющих. Первая связана с безаварийностью работы объектов использования атомной энергии. Другой аспект обеспечения экологической безопасности предполагает ликвидацию негативных последствий прошлой деятельности предприятий [76].

Технология десублимации гексафторида урана относится к осуществляемой деятельности предприятий, связанной с эксплуатацией объектов использования атомной энергии, обращением с ядерными материалами, радиоактивными веществами и радиоактивными отходами [77] и не должна приводить к негативным изменениям в окружающей среде и отрицательно влиять на здоровье человека.

#### **5.3.1 Анализ влияния процесса эксплуатации объекта на окружающую среду**

На сублиматных заводах основным профессиональным фактором вредности является гексафторид урана и продукты его гидролиза, прежде всего фтористый водород.

Технологический процесс получения  $UF_6$  на сублиматном заводе осуществляется в режиме вакуума, за исключением участков перелива жидкого  $UF_6$ , где аппараты эксплуатируются под давлением. Поэтому используемое оборудование имеет высокую степень надёжности и герметичности. В то же время технологический процесс не является замкнутым непрерывным процессом и сопровождается при нормальном регламенте работы вскрытием внутренних объёмов оборудования (баллонов,

ёмкостей и д.р.) и прилегающих к ним отрезков коммуникаций во время проведения операций отсоединения и присоединения ёмкостей, сопровождающихся поступлением в рабочую зону высоколетучего  $\text{UF}_6$  и других фтористых соединений. Особенности технологических процессов сублиматного производства свидетельствуют о значительной вероятности утечек в воздух рабочей зоны газообразного гексафторида урана, а также в случае аварийной разгерметизации ёмкостей. Возможны также нарушения технологического режима, правил техники безопасности, в результате чего газообразные фтористые соединения могут поступать в воздух рабочей зоны, что может вызвать острую интоксикацию людей [78].

Максимальной проектной аварией с выбросом в окружающую среду радиоактивных веществ на сублиматных заводах является авария разгерметизации трубопровода с гексафторидом урана, при котором происходит выброс аэрозолей соединений урана и фтористого водорода. Также опасность представляет хранение отвального гексафторида урана, складированного в хранилищах твёрдых радиоактивных отходов на территориях предприятий. В случае нарушения целостности ёмкостей и трубопровода с ГФУ, вышедший  $\text{UF}_6$  взаимодействует с водяным паром в воздухе, образуя уранилфторид ( $\text{UO}_2\text{F}_2$ ) и фтористый водород ( $\text{HF}$ ). Фторид уранила – твёрдое вещество, которое закупоривает канал учетки, ограничивая дальнейший выброс  $\text{UF}_6$  [79]. Для снижения вероятности воздействия продуктов объекта исследования в следствии разгерметизации контейнеров необходима их переработка: перевод ОГФУ в химически более стойкую закись окись урана ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) и обесфторивание гексафторида урана для организации замкнутого цикла по фтору.

### **5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды**

К общим технологическим защитным мероприятиям, которые обеспечивают минимизацию негативного воздействия от деятельности завода на окружающую среду и человека, относятся:

- соблюдение технологических параметров работы технологических комплексов;
- электроснабжение производства по I категории надёжности;
- использование систем обнаружения утечек жидких и газообразных веществ ( $\text{UF}_6$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2$ ), которые могут привести к поступлению радиоактивных и токсичных веществ в рабочие помещения и окружающую среду;
- установка ёмкостей с жидкими средами в поддонах, предотвращающих их разлив за пределами помещения и завода;
- организация сбора, переработки и утилизации производственных отходов, включая РАО;
- наличие системы локализации технологических аварий;
- очистка отходящих газо-воздушных смесей перед выбросом в атмосферу.

Обеднённый уран, независимо от химической формы (гексафторид, закись-окись, металл), в основном состоит из  $^{238}\text{U}$ , а это - готовый к применению материал для изготовления зон воспроизводства реакторов на быстрых нейтронах (в перспективе они заменят действующие реакторы на тепловых нейтронах).

АО «ПО «Электрохимический завод» первым в России освоило промышленную переработку обеднённого гексафторида урана (ОГФУ) в закись-окись урана и решило в масштабах собственного производства проблему утилизации ОГФУ, используя для этих целей технологию, предложенную французскими атомщиками [80].

Успешное сотрудничество специалистов ПО «ЭХЗ» с коллегами из французских компаний AREVA NC и SGN, которые отвечали за проектные и инженеринговые работы, позволило создать высокоавтоматизированное производство, требующее присутствия человека в основном только для контроля, отвечающее современным требованиям радиационной и экологической безопасности.

Проектирование и эксплуатация технологии переработки ОГФУ

повышенной производительности позволит уменьшить складские площади, а перевод отвалных запасов урана из гексафторида в закись-окись даёт возможность безопасного длительного хранения энергетического ресурса до тех пор, пока он не будет востребован новыми энергетическими технологиями.

## **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Аварии и катастрофы, связанные с взрывами, являются наиболее опасными и непредсказуемыми. При мощных взрывах образуются обширные очаги поражения, в пределах которых разрушаются здания, сооружения, техника, получают травмы и гибнут люди.

Наиболее распространёнными источниками возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются пожары. Взрывы часто сопровождаются пожарами (или являются их следствием).

Пожарная безопасность - состояние объекта, при котором исключается возможность пожара, а в случае его возникновения предотвращается воздействие на людей опасных его факторов и обеспечивается защита материальных ценностей [81].

Противопожарная защита - это комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара.

### **5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

Потенциально опасными объектами (с точки зрения возможности взрыва) являются различные производства на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, фармацевтической и т. д. промышленности.

Цеха конденсационно-испарительных установок относятся к помещениям класса А, т.к. в процессе десублимации рабочим веществом

является гексафторид урана с примесями в виде фтористого водорода.

#### **5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте**

Эксплуатация компьютера для выполнения работы сопровождается вероятностью его возгорания. В современных компьютерах очень высока плотность размещения элементов электронных систем, в непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, коммуникационные кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 80-100°C. При этом возможны оплавление изоляции соединительных проводов, их оголение и, как следствие, короткое замыкание, сопровождаемое искрением, которое ведёт к недопустимым перегрузкам элементов электронных схем [82]. Перегреваясь, они сгорают с разбрызгиванием искр.

#### **5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил

организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [81]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования;
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре.

При соблюдении данных правил пожарной безопасности, на производстве будут исключены случаи возникновения несчастных случаев и чрезвычайных ситуаций, связанных с возникновением пожара.

При возникновении аварийной ситуации необходимо: сообщить руководителю (дежурному), позвонить в аварийную службу или МЧС - тел. 112, принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

В пятом разделе были рассмотрены вопросы социальной ответственности, к которым относятся профессиональная социальная безопасность, экологическая безопасность, а также безопасность в ЧС, правовые и организационные аспекты обеспечения безопасности.

В части «Производственная безопасность» были проанализированы вредные и опасные факторы, возникающие при десублимации  $UF_6$  в ёмкости на разделительных предприятиях атомной отрасли и в ходе исследовательского процесса. К ним относятся отклонение показателей микроклимата в помещении, недостаточная освещённость рабочей зоны, шум, электромагнитное излучение, нервно-психические перегрузки, поражение электрическим током, опасные и вредные химические вещества, ионизирующее излучение.

Рассмотрены организационные и технические мероприятия по защите от действия вредных и опасных факторов исследователя, а также при работе с объектом исследования.

В части «Экологическая безопасность» были рассмотрены возможные аварии, оказывающие наибольшее влияние на окружающую среду, в виде выброса в атмосферу аэрозолей соединений урана, фтористого водорода и рассмотрены мероприятия по их предотвращению.

Для наиболее типичной чрезвычайной ситуации: возникновение пожара на рабочем месте, - в заключительной части раздела рассмотрены мероприятия по её предотвращению и порядок действий во время ЧС.

## Заключение

1. В результате исследования влияния температуры газообразного  $\text{UF}_6$  в коллекторе на среднюю производительность ёмкостей объёмом  $1,0 \dots 4,0 \text{ м}^3$  без оребрения и времени их заполнения десублимированным  $\text{UF}_6$  до 70% свободного объёма при диаметре входного клапана  $65 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , рабочем давлении в коллекторе 80 мм рт. ст., температуре хладагента минус  $25^\circ\text{C}$  показано, что понижение температуры газообразного  $\text{UF}_6$  в коллекторе с  $40$  до  $10^\circ\text{C}$  приводит к линейному увеличению средней производительности на  $7,0 \dots 7,4\%$  и уменьшению времени заполнения ёмкостей на  $6,8 \dots 7,6\%$ .

2. При исследовании зависимости средней производительности и времени заполнения этих же ёмкостей при температуре газообразного  $\text{UF}_6$   $30^\circ\text{C}$  и изменении диаметра входного клапана от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $65 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  с шагом  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  установлено, что увеличение диаметра входного клапана в указанных пределах приводит к увеличению средней производительности на  $76,0 \dots 88,0\%$  и уменьшению времени заполнения ёмкостей в  $4,2 \dots 8,3$  раз.

3. Определён диаметр входного клапана достаточный для эффективной работы ёмкостей: ёмкость объёмом  $1,0 \text{ м}^3 - d_{in} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , ёмкости объёмом  $2,0; 2,5; 3,0 \text{ м}^3 - d_{in} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , ёмкость объёмом  $4,0 \text{ м}^3 - d_{in} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

4. Показано, что малые диаметры входного клапана ёмкости ограничивают расход поступающего в неё газообразного  $\text{UF}_6$  и, соответственно, его подвод к теплообменной поверхности. Поэтому чем больше объём ёмкости, тем больше должен быть диаметр входного клапана для нормальной её работы.

Полученные результаты показывают возможность повышения эффективности технологического процесса десублимации  $\text{UF}_6$  на разделительных предприятиях отрасли за счёт уменьшения температуры газообразного  $\text{UF}_6$  и увеличения диаметра входного клапана.

Данные результаты могут быть использованы для корректировки режима десублимации гексафторида урана в вертикальных погружных ёмкостях без оребрения в АО «ПО ЭХЗ».



## Список публикаций

1. Kotelnikova A. A. Influence of pressure in the collector and the refrigerant temperature to dynamics of filling tanks with smooth inner walls / Orlov A. A., Tsimbalyuk A. F., Malyugin R. V., Kotelnikova A. A., Leontjeva D. A. // AIP Conference Proceedings. - 2019 - Vol. 2101, Article number 020001. - p. 1-6.

2. Kotelnikova A. A. Effect of tank geometry on its average performance / A. A. Orlov, A. F. Tsimbalyuk, R. V. Malyugin, A. A. Kotelnikova, D. A. Leontyeva // AIP Conference Proceedings. - 2018 - Vol. 1938, Article number 020009. – [p. 1-7].

3. Kotelnikova A. A. Plasmachemical synthesis and evaluation of the thermal conductivity of metal-oxide compounds “molybdenum–uranium dioxide” / A. A. Kotelnikova, A. G. Karengin, O. Mendoza Quiroz // AIP Conference Proceedings. - 2018 - Vol. 1938, Article number 020015. – [p. 1-7].

4. Котельникова А. А. Влияние температуры газообразного  $UF_6$  в коллекторе на динамику заполнения ёмкостей с гладкими внутренними стенками десублимированным  $UF_6$  / Котельникова А. А., Орлов А. А. // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 30 Сентября-4 Октября 2019. - Томск: ТПУ, 2019 - С. 90.

5. Котельникова А. А. Влияние геометрии ёмкости, условий тепло- и массообмена на динамику её заполнения десублимированным  $UF_6$  / Котельникова А. А., Мalyugin Р. В., Орлов А. А. // Физическое образование в вузах. – 2018 - Т. 24 - №. S1. - С. 164-165.

6. Котельникова А. А. Плазмохимический синтез металл-оксидных композиций W- $UO_2$  / О. Мендоса Кирос, И. Ю. Новосёлов, А. А. Котельникова // VIII школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 17-19 мая 2017 г., г. Томск. - Томск: Изд-во ТУСУР, 2017. - [С. 84].

7. Котельникова А. А. Плазмохимический синтез и определение теплофизических параметров металл-оксидных композиций " $Mo-UO_2$ " //

Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых учёных, аспирантов и студентов, г. Томск, 30 Октября - 3 Ноября 2017 г. - Томск: Изд-во Графика, 2017 - [С.48].

8. Котельникова А. А. Естественная конвекция газообразного  $UF_6$  в вертикальной цилиндрической ёмкости / Орлов А. А., Малюгин Р. В., Котельникова А. А. // IX Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 17-19 Октября 2018. - Томск: Дельтаплан, 2018 - С. 155.

9. Котельникова А. А. Влияние режима тепло- и массообмена на динамику заполнения ёмкостей с гладкими внутренними стенками десублимированным  $UF_6$  / Котельникова А. А., Малюгин Р. В., Орлов А. А. // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов V Международной научной конференции молодых учёных, аспирантов и студентов, Томск, 19-23 Ноября 2018. - Томск: Графика, 2018 - С. 30.

10. Котельникова А. А. Плазмохимический синтез оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов неодима и магния / Загузин И. Ю., Котельникова А. А., Пшеничников А. С. // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 30 Сентября-4 Октября 2019. - Томск: ТПУ, 2019 - С. 127-128.

11. Котельникова А. А. Влияние отношения высоты к радиусу ёмкости на динамику её заполнения десублимированным  $UF_6$  / А. А. Котельникова, А. Ф. Цимбалюк, Р. В. Малюгин, А. А. Орлов // Изотопы: технологии, материалы и применение: материалы IV Международной научной конференции молодых учёных, аспирантов и студентов, г. Томск, 30 октября - 3 ноября 2017 г. - Томск: Изд-во Графика, 2017 - [С. 15].

12. Котельникова А. А. Моделирование гибких обменных и электроионитных систем изотопного разделения [Электронный ресурс] / В. С.

Балашков, А. С. Дрогалев, А. А. Котельникова, А. П. Вергун // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, 3-6 июня 2015 г., г. Томск. - Томск: Изд-во ТПУ, 2015. - [С. 155-156].  
<http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C49/C49.pdf>

## Список литературы

1. Holden C.A., Bryant H.S. Purification by sublimation // Sep. Sci. Technol. 1969. No. 4. P. 1-13.
2. Edwards C.E., Oliever A.J. Uranium processing: A review of current methods and technology // JOM-J. Min. Met. Mat. S. 2000. No. 52. P. 12–20.
3. Morel B., Duperret B. Uranium and fluorine cycle in the nuclear industry // J. Fluor. Chem. 2009. No. 130. P. 7–10.
4. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Desublimation for purification and transporting UF<sub>6</sub>: Process description and modeling // Sep. Purif. Rev. 2017. Vol. 46, No. 1. P. 81–89.
5. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Kotelnikova A.A., Leontieva D.A. Influence of pressure in the collector and the refrigerant temperature to dynamics of filling tanks with smooth inner walls // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2101. Article number 020001.
6. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Leontieva D.A., Kotelnikova A.A. Effect of tank geometry on its average performance // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1938. Article number 020009.
7. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Glazunov A.A. Dynamics of UF<sub>6</sub> desublimation with the influence of tank geometry for various coolant temperature // MATEC Web Conf. 2016. Vol. 72. Article number 01079.
8. С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов Математическая модель и результаты численных расчетов охлаждения осадительных емкостей при десублимации потока UF<sub>6</sub> и легких примесей / Изд-во: Вестник ТГУ: Математика и механика. №4 (20). – 2012 г.
9. Patnaik P. Handbook of inorganic chemicals. USA, McGraw-Hill Publ., 2002. 1046 p.
10. Weinstock B., Crist R.H. The vapor pressure of uranium hexafluoride. The Journal of Chemical Physics, 1948, vol. 16, no. 5, pp. 436–441.
11. Vasenin I.M., Gubanov S.M., Durnovtsev M.I., Kraynov A.Y. Chukanov M.V. Physico-mathematical modeling of fluoride hydrogen desublimation from gas

mixtures onto walls of a condenser. Tomsk state university journal of mathematics and mechanics, 2014, vol. 31, no. 5, pp. 76–82. In Rus.

12. 24. Ежов В.К. Промышленная ректификационная установка для глубокой очистки сублиматного гексафторида урана // Атомная энергия. - 2007. - Т. 103. - № 5. - С. 314-317.

13. Кац Дж. Химия урана. Том 1 / Дж. Кац, Е. Рабинович. – Москва : Иностранная литература, 1954. – 328 с.

14. Галкин Н.П. Химия и технология фтористых соединений урана / Н.П. Галкин, А.А. Майоров, У.Д. Верятин. – Москва : Атомиздат, 1961. – 344 с.

15. Саймонс Дж. Фтор и его соединения. Том 1 / Дж. Саймонс. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1953. – 493 с.

16. Рысс И.Г. Химия фтора и его неорганических соединений / И.Г. Рысс. – Москва : Госхимиздат, 1988. – 718 с.

17. Shrewsberry R. Chemistry of the chlorine trifluoride-uranyl fluoride reaction / R. Shrewsberry, L. Williamson // Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. – 1966. – V. 28. – P. 2535–2539.

18. Постановление Госгортехнадзора России от 21.05.2003 N 34 "Об утверждении Правил безопасности при эксплуатации железнодорожных вагонов-цистерн для перевозки жидкого аммиака" (Зарегистрировано в Минюсте России 03.06.2003 N 4635).

19. Дубровский А.В. Термическое уравнение состояния аммиака / А.В. Дубровский, В.В. Козында, С.М. Фролов // Горение и взрыв. – 2012. – Вып. 5. – С. 120–124.

20. Дубровский А.В. Аппроксимация термодинамических свойств аммиака / А.В. Дубровский, Н.М. Кузнецов, С.М. Фролов // Горение и взрыв. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 198–214.

21. Span R. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from triple point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa / R. Span, W. Wagner // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1996. – Vol. 25, no. 6. – P. 1509–1596.

22. Вильнина А.В. Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана / А.В. Вильнина, С.В. Ливенцов // Известия Томского политехнического университета. - 2008. - Т. 312. - № 5 - С. 133 - 136.
23. Губанов С.М. Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. - 2011. - Т. 3. - № 4. - С. 383 - 388.
24. Голик В.М., Голик С.В., Иванов С.Л. и др. Разработка масс-спектрометрической с индуктивно-связанной методики анализа гексафторида урана с хроматографическим разделением урана и примесей на колонке со смолой UTEVA // Аналитика и контроль. - 2011. - Т. 15. - № 2. - С. 174-181.
25. Разработка масс-спектрометрической с индуктивно-связанной методики анализа гексафторида урана с хроматографическим разделением урана и примесей на колонке со смолой UTEVA / В.М. Голик, С.Л. Иванов, А.В. Просвирякова и др. // Аналитика и контроль. - 2011. - Т. 15, № 2. - С. 174-181.
26. Математическое моделирование процесса десублимации  $UF_6$  / А.А. Орлов, С.М. Кошелев, В.И. Вандышев и др. // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - Т. 309, № 3. - С. 89-92.
27. Основы химии и технологии мономеров: учеб. пособие / Н.А. Платэ, Е.В. Сливинский. - М.: Наука: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2002. - 696 с.
28. Виноградов С.Н., Таранцев К.В., Виноградов О.С. Выбор и расчет теплообменников. - Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2001. - 100 с.
29. Андреев Г.Г., Дьяченко А.Н. Введение в химическую технологию ядерного топлива. - Томск: Изд-во ТПУ, 2008. - 150 с.
30. Белозеров Б.П., Русаков И.Ю., Андреев Г.Г. и др. Анализ процесса и аппаратуры для десублимации гексафторида урана и других летучих фторидов // Цветные металлы. - 2012. - № 1. - С. 58-61.

31. Губанов С.М. Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 4. – С. 383–388.
32. Математическое моделирование газодинамических процессов охлаждения аппаратов для десублимации гексафторида урана / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов, О.Б. Громов и др. // Химическая промышленность. – 2012. – Т. 89, № 3. – С. 129–137.
33. Губанов С.М. Математическая модель и результаты численных расчетов охлаждения осадительных емкостей при десублимации потока  $UF_6$  и легких примесей / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Вестник томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 4 (20). – С. 56–65.
34. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Mathematical modeling of process of obtaining the solid uranium hexafluoride // Key Eng. Mater. 2016. Vol. 683. P. 533–539.
35. Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф., Малюгин Р.В., Котельникова А.А. Естественная конвекция газообразного  $UF_6$  в вертикальной цилиндрической емкости // Изв. ВУЗов. Физика. 2018. Т. 61, №12/2. С. 79–84.
36. Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф., Малюгин Р.В. Математическая модель процесса десублимации гексафторида урана // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2016. № 2. С. 75–83.
37. Лапин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука. 1989.
38. Panton Roland L. Incompressible flow. John Wiley and Sons Inc. 2005.
39. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: перев. с немецкого. М.: Наука. 1974.
40. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука. 1976.

41. Мажукин А.В., Мажукин В.И. Динамическая адаптация в параболических уравнениях // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2007. Т. 47, № 11. С. 1913–1936.
42. Katz J.J., Rabinowiych E. The chemistry of uranium. Part I. The element, its binary and related compounds. McGraw-Hill (Ed). New York. 1961.
43. Llewellyn D.R. Some physical properties of uranium hexafluoride // J. Chem. Soc. (Resumed). 1953. P. 28–36.
44. Zhang J. Analysis on holdup during processing  $UF_6$  // Journal of radioanalytical and nuclear chemistry. 2014. Vol. 299. No. 1. P. 517–522.
45. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere. Washington D.C. 1980.
46. Hu M.-H., Wu J.-S., Chen Y.-S. Development of parallelized 2D/2D-axisymmetric Navier-Stokes equations and multigrid method // Comput. Fluids. 2011. Vol. 45, No. 1. P. 241–248.
47. Corcione M., Cianfrini M., Quintino A. Enhanced natural convection heat transfer of nanofluids in enclosures with two adjacent walls heated and the two opposite walls cooled // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 88. P. 902–913.
48. Mamourian M., Milani Shirvan K., Ellahi R., Rahimi A.B. Optimization of mixed convection heat transfer with entropy generation in a wavy surface square lid-driven cavity by means of Taguchi approach // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 102. P. 544–554.
49. Xiao H., Wang J., Liu Z., Liu W. A consistent SIMPLE algorithm with extra explicit prediction – SIMPLEC // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 120. P. 1255–1265.
50. Орлов А.А., Малюгин Р.В., Леонтьева Д.А. Динамика заполнения емкостей различной геометрии с вертикальным оребрением десублимированным  $UF_6$  // Изотопы: технологии, материалы и применение: мат. V Междунар. науч. конф., Томск 19–23 ноября 2018. Томск: Изд-во Графика, 2018. С. 29.



51. Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф., Малюгин Р.В. Десублимация  $UF_6$  в емкостях с вертикальным оребрением // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54, № 1. С. 52–61.

52. Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф., Малюгин Р.В. Математическое моделирование процесса десублимации  $UF_6$  в емкостях с горизонтальным оребрением // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54, № 2.

53. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шапаваова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.

54. Рассел, Джесси Диаграмма Ганта / Джесси Рассел. - М.: VSD, 2012. - 591 с.

55. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)

56. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

57. "ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере" (утв. Приказом Минсвязи РФ от 02.07.2001 N 162).

58. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

59. ГОСТ 12.1.003-74 "ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация".

60. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

61. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

62. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

63. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к

микроклимату производственных помещений»; утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.

64. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.

65. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.

66. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

67. Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.

68. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.

69. "Конституция Российской Федерации" (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 N 6-ФКЗ, от 30.12.2008 N 7-ФКЗ, от 05.02.2014 N 2-ФКЗ, от 21.07.2014 N 11-ФКЗ).

70. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.— М.: Минрегион России, 2016.

71. МР 2.2.9.2311-07 Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности.

72. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.

73. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

74. СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010).

75. РД-03-48-99 Руководящие документы. Инструкция по осуществлению надзора за конструированием оборудования для ядерных установок, радиационных источников, пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилищ радиоактивных отходов.

76. "Безопасность Окружающей Среды" Журнал №4: Экологические

программы атомной отрасли. 2010 г.

77. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. N 170-ФЗ "Об использовании атомной энергии".

78. Средства индивидуальной защиты персонала предприятий атомной промышленности и энергетики. Каталог-справочник. М.; 2015.

79. Орехов В.Т., Власов А.А., Козлова Е.И. и др., Современные методы обращения с отвалами обедненного  $UF_6$ , 5-я Всероссийская (Международная) научная конференция Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул, Звенигород, 02-06 октября 2000, с. 25-34.

80. Интегрированный публичный годовой отчёт ОАО «ПО «Электрохимический завод». - 2009 г.

81. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 27.12.2018) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

82. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением №1).

## Приложение А

### **Influence of the inlet valve diameter and the gaseous UF<sub>6</sub> temperature on the dynamics of filling tanks without finning of desublimated UF<sub>6</sub>**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Котельникова Александра Александровна		

Консультант лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Смирнова Ульяна Александровна	-		

## **Abstract**

The paper presents the results of calculations of the filling time and average performance of tanks with a volume of 1,0, 2,0, 2,5, 3,0 and 4,0 m<sup>3</sup> without finning when the inlet valve diameter and the temperature of the gaseous UF<sub>6</sub> in the collector change. The results show that reducing the temperature of gaseous UF<sub>6</sub> from 40 to 10°C can increase the average performance of tanks from 7,0 to 7,4 % and increasing the diameter of the inlet valve from  $5 \cdot 10^{-3}$  to  $65 \cdot 10^{-3}$  m leads to an increase in the average performance of tanks from 76,0 to 88,0%.

## **Introduction**

Nowadays, isotope separation plants improve their basic technological equipment [1-3]. Gas centrifuges are being replaced by more efficient next-generation machines. Due to this, there is a need to increase the performance of sublimators of uranium hexafluoride, which are an integral part of the enterprises of the separation-sublimation plant of the nuclear fuel cycle. You can solve the problem of increasing the performance of sublimators of uranium hexafluoride in the following ways:

1. To develop and design condensing-evaporating devices increased productivity;
2. To optimize the operating modes of the used devices, ensuring the maximum rate of desublimation (sublimation) of UF<sub>6</sub> and the completeness of filling of transport tanks;
3. To improve the design of transport tanks.

Currently, the technological modes of operation collectors desublimation of UF<sub>6</sub> are mainly based on experimental data. Mathematical modeling of the UF<sub>6</sub> desublimation process allows us to conduct research to improve the performance of this process at a minimum cost in a shorter time than when conducting experimental studies.

One of the promising ways to achieve the goals set for Rosatom separation enterprises is the development of mathematical models that take into account the

non-stationary processes of heat and mass transfer of  $\text{UF}_6$  desublimation.

The process of desublimation of uranium hexafluoride is non-stationary, however, a review and analysis of literature data [4] showed that the currently developed mathematical models of the process of desublimation of uranium hexafluoride are stationary or quasi-stationary.

Existing mathematical models of the  $\text{UF}_6$  desublimation process have certain drawbacks [4]: they use empirical data to calculate, they do not take into account the non-stationary processes of heat and mass transfer, convective and diffusive movement of gaseous  $\text{UF}_6$  in tanks, and the presence of internal finning.

In this regard, for a theoretical study of the unsteady process of desublimation of  $\text{UF}_6$  in transport tanks, it is necessary to develop a mathematical model based solely on physical ideas about the ongoing process and devoid of the disadvantages of known models.

This work describes the developed, software-implemented and verified two-dimensional mathematical model of the unsteady process of desublimation of  $\text{UF}_6$  in vertical submerged tanks [5–7] and the results obtained using it to research the influence of the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$  in the collector and the diameter of the inlet valve of tanks of various volumes without finning on filling time and average performance of these tanks.

## Object of study

Vertical submerged tanks with a volume of 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 and 4,0 m<sup>3</sup> and without finning with a wall thickness of  $6 \cdot 10^{-3}$  m were considered as an object of study. Figure 1 shows the vertical submerged tank and the corresponding calculated tank area.

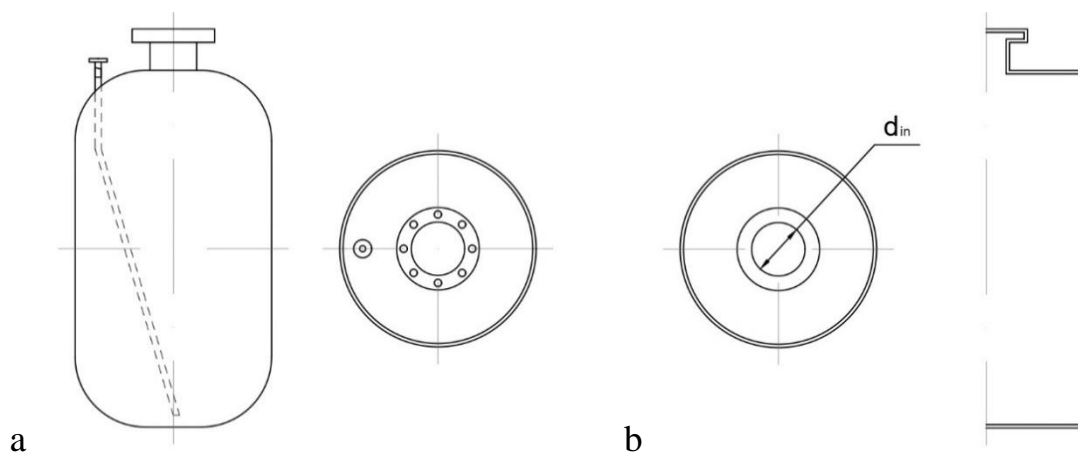


Figure 1 – Vertical submerged tank without finning (a), Calculated area of tank without finning (b),  $d_{in}$  – inlet valve diameter

The process of desublimation takes place at a temperature of the refrigerant (saturated solution of  $\text{CaCl}_2$ ) minus 25°C, at a working pressure in the collector of 80 mmHg and a pressure in the tank of 4 mmHg.

The geometric dimensions of the tanks under consideration are given in table 1.

Table 1 – Geometric dimensions of tanks

Tank capacity, $V, \text{ m}^3$	Tank height, $H, \text{ m}$	Tank radius, $R, \text{ m}$	$H/R$
1,0	1,273	0,5	2,546
2,0	1,768	0,6	2,947
2,5	1,884	0,65	2,898
3,0	1,949	0,7	2,784
4,0	2,264	0,75	2,264

## Research results and discussion

The influence of the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$  and the diameter of the inlet valve of the tanks on the dynamics of filling tanks with desublimated  $\text{UF}_6$  up to 70% of their free volume was studied in tanks with a volume of 1,0...4,0  $\text{m}^3$  with a pressure at the initial filling moment of 4 mmHg, working pressure in the collector 80 mmHg and the temperature of the refrigerant (saturated solution of  $\text{CaCl}_2$ ) minus 25°C.

When determining the effect of the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$  in the collector on the average performance of the tanks and the time of their filling, it was considered that the diameter of the inlet valve of the tanks was  $65 \cdot 10^{-3}$  m. The temperature of the gaseous  $\text{UF}_6$  in the collector was changed from 10 to 40°C in increments of 5°C.

The results of calculations of the average performance of tanks of different volumes and the time of their filling from the temperature of the refrigerant are shown in Figures 2, 3 and in table 2.

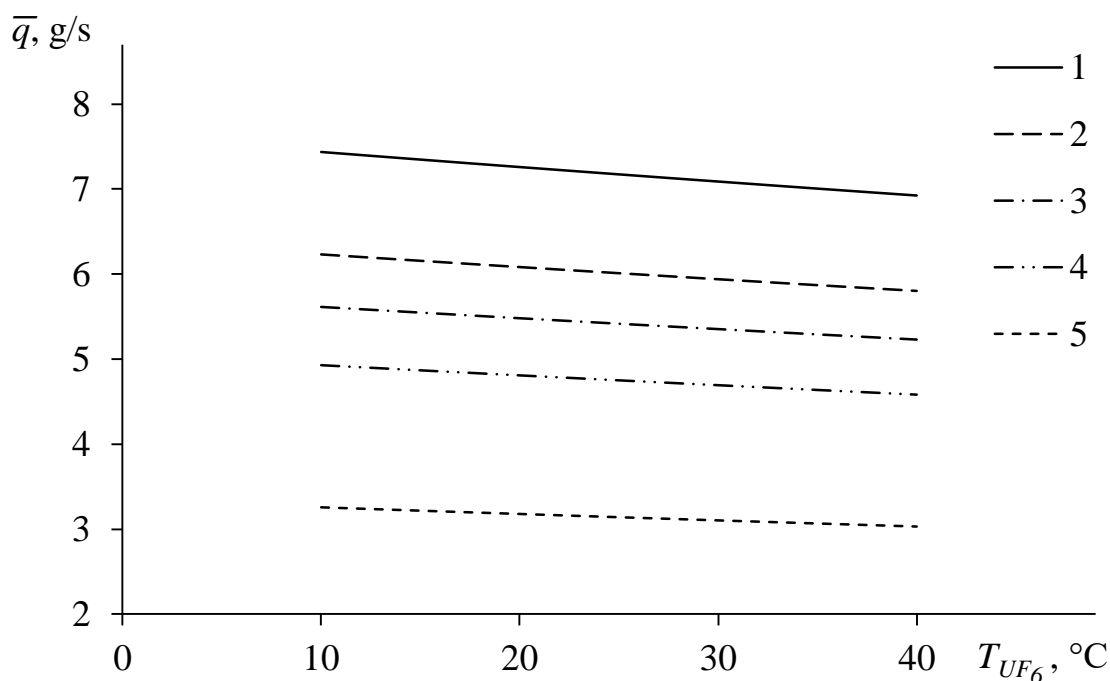


Figure 2 – The dependence of the average performance of the tanks on the temperature of the gaseous  $\text{UF}_6$  in the collector:

1 – 4,0  $\text{m}^3$ ; 2 – 3,0  $\text{m}^3$ ; 3 – 2,5  $\text{m}^3$ ; 4 – 2,0  $\text{m}^3$ ; 5 – 1,0  $\text{m}^3$



Table 2 – Change in average performance and time of filling tanks with desublimated UF<sub>6</sub> to 70% of their free volume when changing the temperature of gaseous UF<sub>6</sub> in the collector from 10 to 40°C

Tank capacity, $V, \text{ m}^3$	Increase average tank performance, $\Delta\bar{q}, \%$	Reducing tank filling time, $\Delta t, \%$
1,0	7,0	7,6
2,0	7,0	7,5
2,5	7,4	6,9
3,0	7,4	6,9
4,0	7,3	6,8

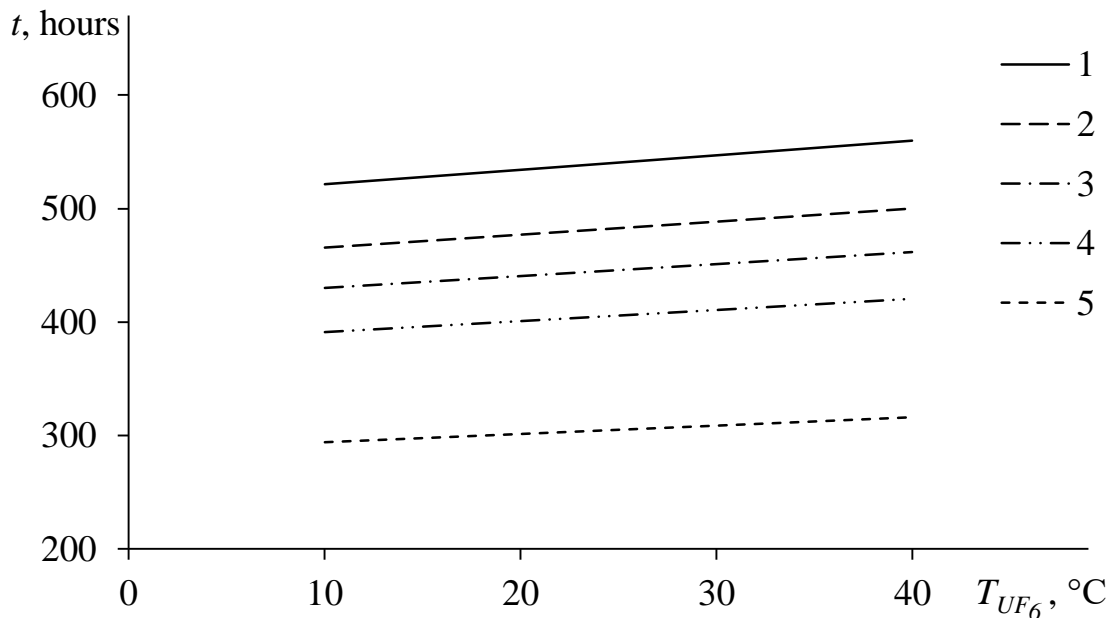


Figure 3 – Dependence of tank filling time on the temperature of gaseous UF<sub>6</sub> in the collector:

1 – 4,0 m<sup>3</sup>; 2 – 3,0 m<sup>3</sup>; 3 – 2,5 m<sup>3</sup>; 4 – 2,0 m<sup>3</sup>; 5 – 1,0 m<sup>3</sup>

The calculations of the dynamics of filling tanks without finning with a volume of 1,0...4,0 m<sup>3</sup> by desublimated UF<sub>6</sub> (Figures 2 and 3, Table 2) showed that a decrease in the temperature of gaseous UF<sub>6</sub> in the collector from 40 to 10°C leads to a linear increase in average performance from 7,0 to 7,4% and a decrease in tank filling time from 6,8 to 7,6%. This is due to the fact that with increasing temperature

of gaseous  $\text{UF}_6$  in the collector, it is required to remove more heat from it through the desublimation layer and the tank wall to the refrigerant. Lowering the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$  below  $10^\circ\text{C}$  has not been considered, since it will require additional refrigeration equipment, which will complicate the technology and increase its cost, and can also lead to clogging of the collector pipelines with desublimation.

To demonstrate the non-stationarity of the process, let us cite as an example the dependence of the dynamics of changes in the mass of desublimated  $\text{UF}_6$  and the average performance tank of a volume of  $1,0 \text{ m}^3$  (Figure 4).

From the graphs of the dependence of the mass dynamics of the desublimated  $\text{UF}_6$  and the average performance of the tank on the temperature of the gaseous  $\text{UF}_6$  (Figure 4), it can be seen that the presented dependences are nonlinear.

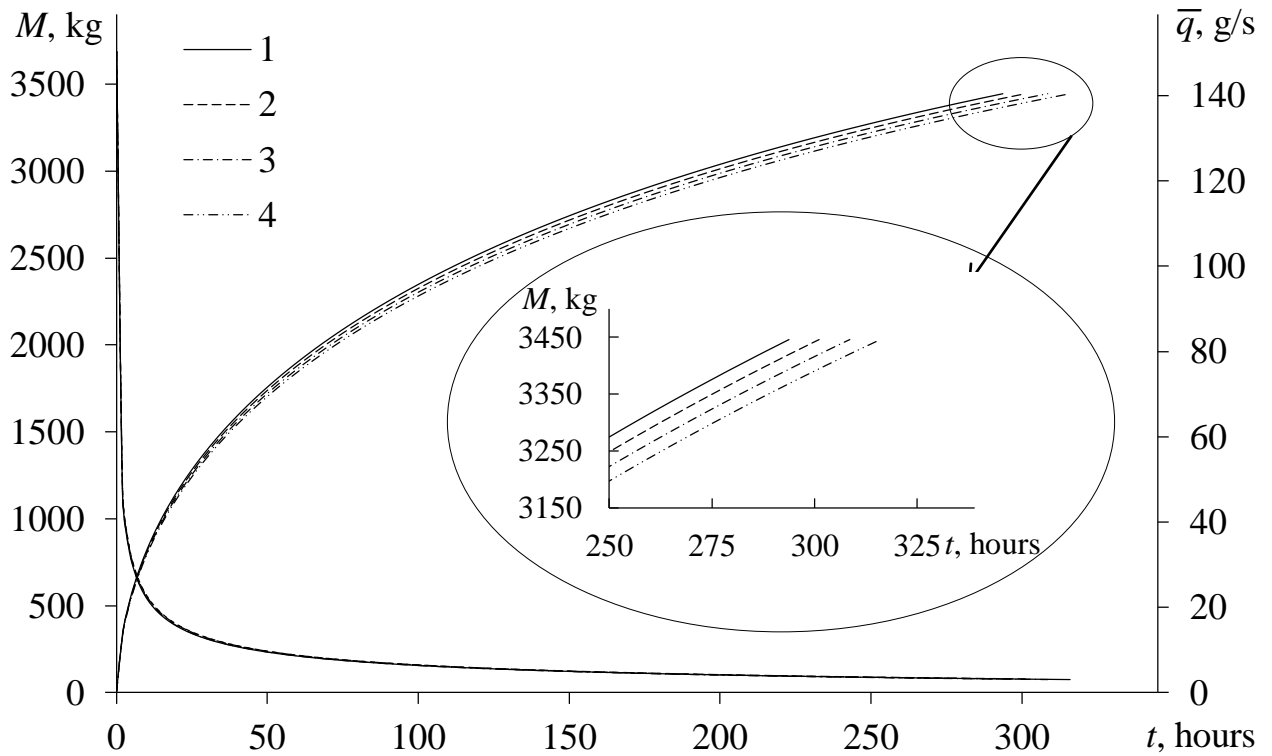


Figure 4 – Dynamics of changes in the mass of desublimated  $\text{UF}_6$  and the average performance tank of  $1,0 \text{ m}^3$  in volume at the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$ :

1 –  $10^\circ\text{C}$ , 2 –  $20^\circ\text{C}$ , 3 –  $30^\circ\text{C}$ , 4 –  $40^\circ\text{C}$

Next, the dependence of the average performance and filling time of tanks of various volumes was studied at a gaseous temperature  $\text{UF}_6$  of  $30^\circ\text{C}$  and a change in the diameter of the inlet valve from  $5 \cdot 10^{-3}$  to  $65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  in increments of  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

The calculation results are shown in figures 5, 6 and in tables 3, 4.

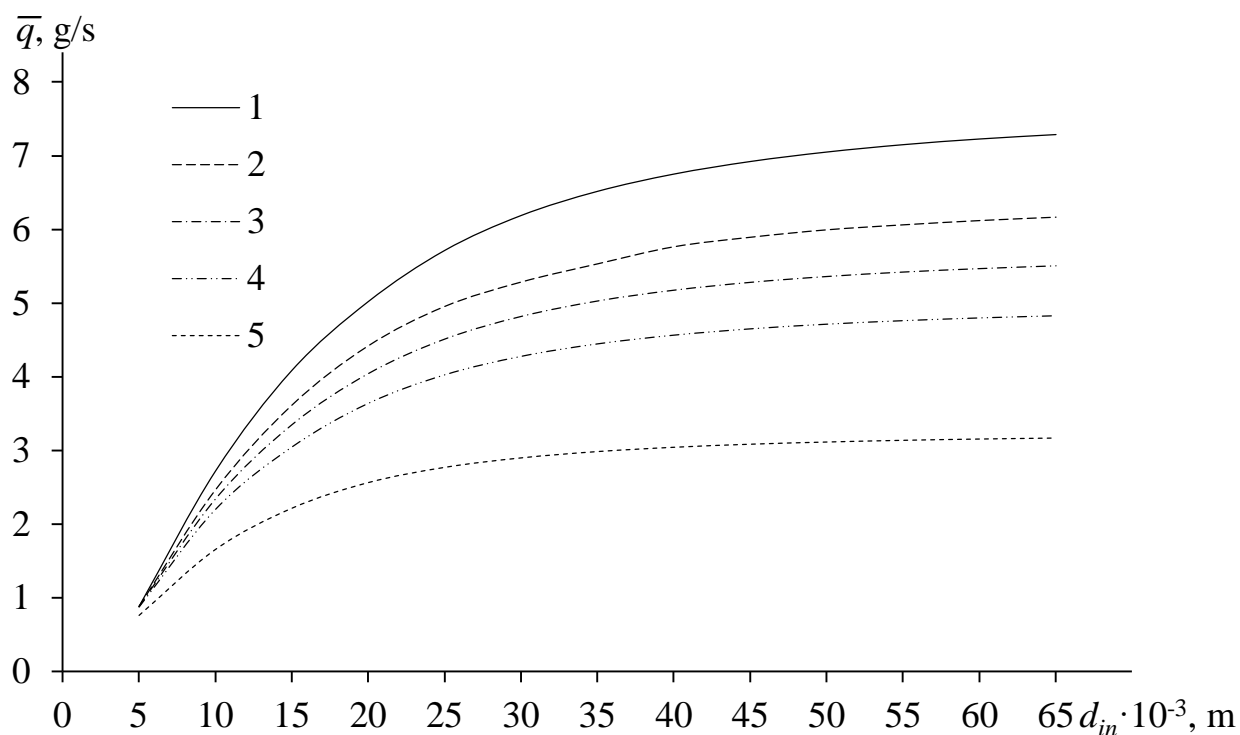


Figure 5 – The dependence of the average performance of the tanks without finning of various volumes on the diameter of the inlet valve:

1 – 4,0 m<sup>3</sup>, 2 – 3,0 m<sup>3</sup>, 3 – 2,5 m<sup>3</sup>, 4 – 2,0 m<sup>3</sup>, 5 – 1,0 m<sup>3</sup>

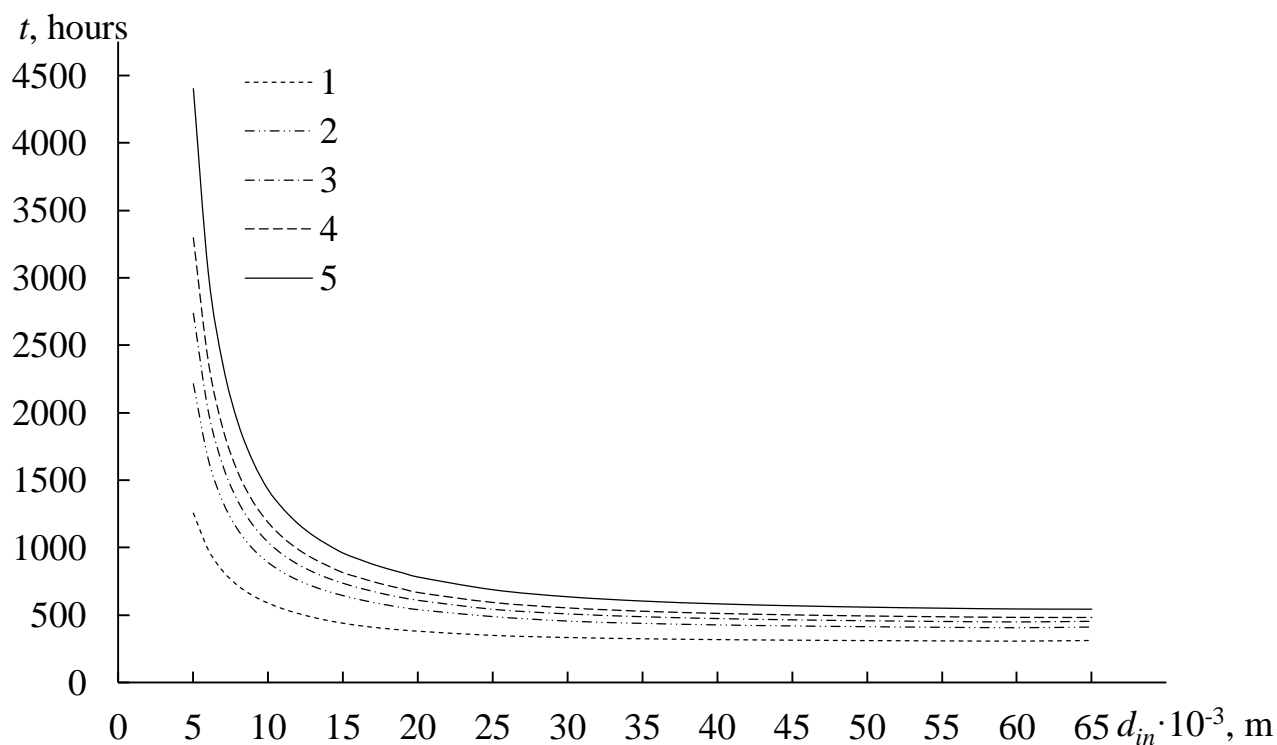


Figure 6 – Dependence of the time of filling tanks without finning of various volumes on the diameter of the inlet valve:

1 – 1,0 m<sup>3</sup>, 2 – 2,0 m<sup>3</sup>, 3 – 2,5 m<sup>3</sup>, 4 – 3,0 m<sup>3</sup>, 5 – 4,0 m<sup>3</sup>

Figures 5 and 6 show that as the inlet valve diameter increases, the average performance of tanks increases and their filling time decreases. Increasing the volume of tanks leads to an increase in their filling time.

Table 3 – Change in average performance  $\bar{q}$  and filling time of tanks of various volumes  $t$  without finning by desublimated  $\text{UF}_6$  when changing the diameter of the inlet valve  $d_{in}$  from  $c\ 5 \cdot 10^{-3}$  to  $65 \cdot 10^{-3}$  m

Tank capacity, $V, \text{ m}^3$	Increase average tank performance $\Delta\bar{q}, \%$	Reducing tank filling time $\Delta t, \text{ times}$
1,0	76,0	4,2
2,0	82,0	5,5
2,5	84,0	6,2
3,0	85,7	7,0
4,0	88,0	8,3

If we accept a change in  $\Delta\bar{q}$  and  $\Delta t$  of no more than 5%, when the dependences of  $\bar{q}$  and  $t$  on  $d_{in}$  become almost linear (Figs. 5, 6), then according to the data in table 4, we can determine the diameter of the inlet valve sufficient for efficient operation of the tanks: for a tank with a volume of  $1,0 \text{ m}^3$   $d_{in}$  will be equal to  $25 \cdot 10^{-3}$  m, for tanks with a volume of  $2,0; 2,5; 3,0 \text{ m}^3$  -  $30 \cdot 10^{-3}$  m, for a volume of  $4,0 \text{ m}^3$  -  $35 \cdot 10^{-3}$  m.

Figure 7 shows the dynamics of the mass of desublimated  $\text{UF}_6$  in a tank with a volume of  $1,0 \text{ m}^3$  for various values of the inlet valve diameter.

It can be seen from the dependencies in Figure 7 that for small diameters of the inlet valve, the initial sections of the curves are linear and, the smaller the diameter, the longer the linear section of the curve. This can be explained by the fact that the small diameters of the tank inlet valve limit the flow of gaseous  $\text{UF}_6$  entering it and, accordingly, its supply to the heat exchange surface. An increase in the thickness of the desublimation layer and an increase in its thermal resistance leads to a decrease in the rate of desublimation. After the average performance of the tank becomes less than the flow rate of gaseous  $\text{UF}_6$  entering through the inlet valve

Table 4 – Change in average performance  $\Delta\bar{q}$  and time of filling tanks  $\Delta t$  of various volumes without finning with desublimated  $\text{UF}_6$  when changing the diameter of the inlet valve  $d_{in}$  by one step ( $5 \cdot 10^{-3}$  m)

$\Delta d_{in}$ $\cdot 10^{-3}, \text{m}$	$V, \text{m}^3$									
	1,0		2,0		2,5		3,0		4,0	
	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$	$\Delta\bar{q},$ %	$\Delta t, \%$
5-10	54,0	117,4	60,3	151,7	62,3	165,3	64,3	180,2	67,7	209,4
10-15	25,3	33,8	27,8	38,5	30,1	43,1	31,8	46,7	33,5	50,4
15-20	13,6	15,7	16,3	19,5	17,2	20,7	18,3	22,3	18,6	22,9
20-25	7,5	8,1	9,6	10,6	10,4	11,6	10,8	12,1	12,2	13,8
25-30	4,4	4,6	5,9	6,2	6,4	6,8	6,3	6,7	7,7	8,3
30-35	2,9	3,0	3,8	3,9	4,2	4,4	4,5	4,7	5,0	5,3
35-40	1,9	2,0	2,6	2,7	2,8	2,9	4,0	4,2	3,5	3,6
40-45	1,4	1,4	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,5	2,5
45-50	1,0	1,0	1,4	1,4	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,9
50-55	0,7	0,7	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,4	1,4
55-60	0,6	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1
60-65	0,4	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8

(Figure 7), the dependence becomes non-linear. As the inlet valve diameter increases, the curve becomes more nonlinear, which is consistent with the theory of unsteady processes. For larger tanks, the influence of the valve diameter on the desublimation process is enhanced. The larger the volume of the tank and the smaller the diameter of the inlet valve, the longer the linear portion of the curve  $M(t)$ .

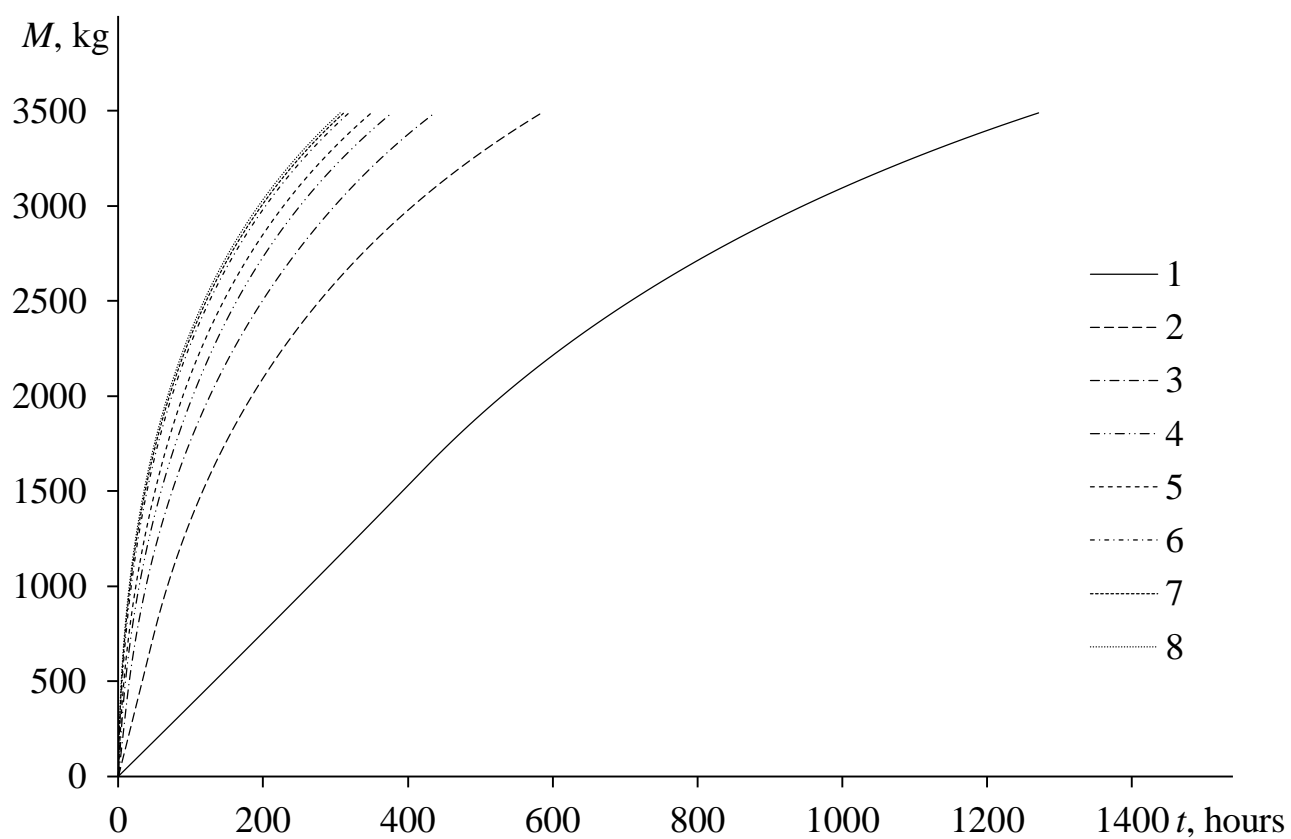


Figure 7 – Dynamics of changes in the mass of desublimated  $\text{UF}_6$  in a tank with a volume of  $1,0 \text{ m}^3$  from the time of its filling:

1 –  $d_{in}=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , 2 –  $d_{in}=10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , 3 –  $d_{in}=15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , 4 –  $d_{in}=20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ,  
 5 –  $d_{in}=25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , 6 –  $d_{in}=40 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , 7 –  $d_{in}=50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , 8 –  $d_{in}=65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

## Conclusion

1. As a result of the research is the effect of the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$  in the collector on the average productivity of tanks with a volume of  $1,0 \dots 4,0 \text{ m}^3$  without finning and the time of their filling with desublimated  $\text{UF}_6$  up to 70% of its free volume with an inlet valve diameter of  $65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , working pressure in the reservoir 80 mmHg, refrigerant temperature minus  $25^\circ\text{C}$  it is shown that lowering the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$  in the collector from  $40$  to  $10^\circ\text{C}$  leads to a linear increase in average productivity from 7,0 to 7,4% and a decrease in the filling time of tanks from 6,8 to 7,6%.

2. While investigating the dependence of average productivity and filling time of the same tanks at a gaseous temperature  $\text{UF}_6$  of  $30^\circ\text{C}$  and changing the diameter of the inlet valve from  $5 \cdot 10^{-3}$  to  $65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  in increments of  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , it was found that an increase in the diameter of the inlet valves within the specified limits leads to an increase in average productivity from 76,0 to 88,0% and a decrease in the time of filling tanks from 4,2 to 8,3 times.

3. As a result of the study, the diameter of the inlet valve was determined sufficient for the efficient operation of the tanks: for a tank with a volume of  $1,0 \text{ m}^3$   $d_{in} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , for tanks with a volume of 2,0; 2,5;  $3,0 \text{ m}^3$  -  $d_{in} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , for a tank with a volume of  $4,0 \text{ m}^3$  -  $d_{in} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

4. It is shown that the small diameters of the tank inlet valve limit the flow of gaseous  $\text{UF}_6$  entering it and, accordingly, its supply to the heat exchange surface. Therefore, the larger the capacity, the larger the diameter of the inlet valve must be for its normal operation.

The results show the possibility of increasing the efficiency of the  $\text{UF}_6$  desublimation process at separation plants of the industry by reducing the temperature of gaseous  $\text{UF}_6$  and increasing the diameter of the inlet valve.

## References

1. Holden C.A., Bryant H.S. Purification by sublimation // Sep. Sci. Technol. 1969. No. 4. P. 1-13.
2. Edwards C.E., Oliever A.J. Uranium processing: A review of current methods and technology // JOM-J. Min. Met. Mat. S. 2000. No. 52. P. 12–20.
3. Morel B., Duperret B. Uranium and fluorine cycle in the nuclear industry // J. Fluor. Chem. 2009. No. 130. P. 7–10.
4. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Desublimation for purification and transporting UF<sub>6</sub>: Process description and modeling // Sep. Purif. Rev. 2017. Vol. 46, No. 1. P. 81–89.
5. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Kotelnikova A.A., Leontieva D.A. Influence of pressure in the collector and the refrigerant temperature to dynamics of filling tanks with smooth inner walls // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2101. Article number 020001.
6. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Leontieva D.A., Kotelnikova A.A. Effect of tank geometry on its average performance // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1938. Article number 020009.
7. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Glazunov A.A. Dynamics of UF<sub>6</sub> desublimation with the influence of tank geometry for various coolant temperature // MATEC Web Conf. 2016. Vol. 72. Article number 01079.